

PROJETO DE FABRICAÇÃO EM COMANDO NUMÉRICO DO CORPO DE UMA
GUITARRA ELÉTRICA

Marco Antero Rodrigues Silva Filho

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Anna Carla Araujo; DSc.

Prof. Flávio de Marco Filho; DSc.

Prof. Vitor Ferreira Romano; Dott.Ric.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Marco Antero Rodrigues Silva e Lumena Maria Castilho de Souza Silva, pelo apoio e amor incondicional e pelos ensinamentos fundamentais da vida que me tornaram o homem que sou hoje.

À minha irmã, Paula Souza Silva por ser um refúgio de afeto e carinho mesmo nos momentos mais turbulentos.

Às minhas avós, Ester da Costa Silva e Otília Castilho de Souza (*in memoriam*), e ao meu avô Paulo Souza (*in memoriam*), por terem sido um ombro amigo e um exemplo de força todos os dias.

Aos meus amigos e futuros Engenheiros Mecânicos Bernardo Donni de Sena e Antônio Victor Miragaia Lopes, pela companhia nos momentos felizes e pela ajuda nos difíceis.

À minha amiga Akemi Magalhães Moura Aoki, por todos os momentos que passamos juntos e pelos conselhos prestados.

Ao amigo e professor de música, Saulo Battesini, pelos ensinamentos e pela influência que me passou.

Aos meus amigos da Promon Engenharia, que tive o privilégio de conhecer em 2012, e me proporcionaram muitos momentos alegres, me ajudando a crescer tanto como pessoa e profissionalmente.

SUMÁRIO

1	Introdução	9
1.1	Motivação	9
1.2	Organização do Projeto.....	9
1.3	A Guitarra Elétrica.....	9
1.4	Componentes de uma guitarra elétrica.....	10
2	Usinagem da Madeira.....	12
2.1	Movimentos e grandezas nos processos de usinagem.....	12
2.2	Parâmetros de corte nos processos usados em madeira	13
	Velocidade de Corte.....	14
	Velocidade de Avanço.....	15
	Avanço por dente.....	15
2.3	Fresamento	16
2.3.1	Material da Ferramenta.....	19
3	O Comando Numérico Computadorizado	20
4	Projeto da fabricação.....	22
4.1	A Guitarra Selecionada.....	22
4.1.1	Formato	22
4.1.2	Material	23
4.1.3	O Mogno Amazônico	24
4.1.4	Modelo 3D da Guitarra	24
4.1.5	Corpo	24
	O desenho técnico da guitarra é mostrado no Anexo III.....	25
4.2	Materia Prima (Stock)	25
4.3	Seleção das ferramentas utilizadas.....	26
4.4	Seleção e dados da fresadora CNC.....	26
4.5	Métodos De Posicionamento	28
4.6	Fixação da matéria prima	28
4.7	Temperatura e proteção contra fogo.....	28

5	Descrição do Processo de Fabricação	30
5.1	<i>Configurações Iniciais.....</i>	30
5.1.1	Preparação em SolidWorks	30
5.1.2	Definição do Tipo de Centro de Usinagem	30
5.1.3	Orientação e Origem	30
5.1.4	Bloco de Usinagem (Stock)	31
5.1.5	Parâmetros de corte	32
5.2	<i>Operações e Movimentos.....</i>	34
5.2.1	Tipos de Operações utilizadas	34
5.2.2	Lista das Operações	34
5.2.3	Movimentos Utilizados	35
5.3	<i>Fabricação da guitarra</i>	39
5.3.1	Operação 1: Abertura da cavidade da parte elétrica	39
5.3.2	Operação 2: Abertura da cavidade do cabo	40
5.3.3	Operação 3: Abertura da cavidade dos captadores	41
5.3.4	Operação 4: Abertura dos furos do braço	42
5.3.5	Operação 5: Furacão da estrutura de fixação da ponte.	43
5.3.6	Operação 6: Abertura da cavidade do braço da guitarra	45
5.3.7	Operações 7 e 8: Desbaste e acabamento da Zona de conforto 1	46
5.3.8	Operações 9 e 10: Desbaste e acabamento da Zona de conforto 2	48
5.3.9	Operações 11 a 16: Desbaste e acabamento das laterais superiores 1,2,3	48
5.3.10	Operações 1 a 16: Parte de frente da guitarra	49
5.3.11	Operação 17: Abertura da cavidade da ponte.....	51
5.3.12	Operação 18: Abertura da cavidade do sistema de alavanca	52
5.3.13	Operações 19 a 22: Desbaste e acabamento das Zonas de conforto 3 e 4	52
5.3.14	Operações 23 a 26: Desbaste e acabamento das laterais inferiores 1 e 2	53
5.3.15	Operações 27: Contorno do perímetro da guitarra	54
5.3.16	Operações 17 a 27: Parte de trás da guitarra	55
5.3.1	Operações 1 a 27: Guitarra Finalizada	56
5.4	<i>Detalhes do processo de usinagem</i>	57
6	Análise de Custos.....	60
6.1	<i>Ciclos e tempos de usinagem</i>	60
6.2	<i>Estimativas dos tempos de usinagem</i>	61
6.3	<i>Custos de produção</i>	62
6.4	<i>Estimativa dos custos de produção</i>	64

6.5	<i>Viabilidade econômica do projeto</i>	66
7	Conclusão	67
8	Referências Bibliográficas	68
ANEXO I	70
ANEXO II	71
ANEXO III	74
ANEXO IV	75

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Componentes de uma guitarra.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2 - Movimentos de usinagem.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3 - Grandezas de Usinagem</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4 - Avanço por dente (fz)</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5 –Tipos fundamentais de fresamento</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6 – Geometria de uma fresa de topo.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 – Tipos de fresa de topo</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8 - Formatos de Guitarra.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9 - Fender Stratocaster</i>	<i>23</i>
<i>Figura 10 – Modelo 3D do corpo de uma Fender Stratocaster.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12 – Dimensões do bloco de Madeira (Stock).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11 – Dimensões do Corpo</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13 - Orientação dos eixos da fresadora CNC.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14 - Orientação dos eixos no Mastercam.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15 - Stock</i>	<i>32</i>
<i>Figura 16 - Movimento de mergulho</i>	<i>36</i>
<i>Figura 17 - Movimento de Rampa.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18 - Cálculo Trigonométrico das alturas de crista</i>	<i>38</i>
<i>Figura 19 - Altura das cristas para um passo radial (stepover) maior.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 20 - Altura das cristas para um passo radial(stepover) menor</i>	<i>39</i>
<i>Figura 21 - Cavidade da parte elétrica no modelo 3D.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 22 - Simulação da abertura da cavidade da parte elétrica.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 23 - Cavidade do cabo no modelo 3D.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 24 – Simulação da abertura da cavidade do cabo</i>	<i>41</i>
<i>Figura 25 - Cavidade dos captadores no modelo 3D</i>	<i>42</i>
<i>Figura 26 – Simulação da abertura da cavidade dos captadores.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 27 - Furos do braço no modelo 3D.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 28 - Simulação do Pocketing dos furos do braço</i>	<i>43</i>
<i>Figura 29 - Furos da ponte no modelo 3D.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 30 - Simulação da furacão da estrutura de fixação da ponte.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 31 - Cavidade do braço no modelo 3D.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 32 - Simulação da abertura da cavidade do braço</i>	<i>45</i>
<i>Figura 33 - Zona de conforto 1 no modelo 3D.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 34 - Simulação da criação de superfície da zona de conforto 1</i>	<i>47</i>
<i>Figura 35 - Zona de conforto 2 no modelo 3D.....</i>	<i>48</i>

<i>Figura 36 - Simulação criação de superfície da zona de conforto 2</i>	<i>48</i>
<i>Figura 37 - Laterais superiores 1,2 e 3 no modelo 3D.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 38 - Simulação criação de superfície das laterais superiores 1,2 e 3.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 39 - Parte de cima da guitarra no modelo 3D.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 40 - Simulação das operações 1 a 16.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 41 - Cavidade da ponte no modelo 3D.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 42 - Simulação do Pocketing da cavidade da ponte.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 43 - Cavidade do sistema de alavanca no modelo 3D</i>	<i>52</i>
<i>Figura 44 - Simulação do Pocketing da cavidade do sistema de alavanca</i>	<i>52</i>
<i>Figura 45 - Zonas de conforto 3 e 4 no modelo 3D.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 46 - Simulação criação de superfície das zonas de conforto 3 e 4.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 47 - Laterais inferiores 1 e 2 no modelo 3D</i>	<i>54</i>
<i>Figura 48 - Simulação criação de superfície das laterais inferiores 1 e 2</i>	<i>54</i>
<i>Figura 49 - Perímetro da guitarra no modelo 3D</i>	<i>55</i>
<i>Figura 50 - Simulação do Contorno do perímetro da guitarra.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 51 - Parte de trás da guitarra no modelo 3D</i>	<i>56</i>
<i>Figura 52 - Simulação das operações 17 a 27.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 53 - Corpo da guitarra no modelo 3D.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 54 - Simulação de todas as operações</i>	<i>57</i>
<i>Figura 55 - Tempos, percursos e velocidades do processo</i>	<i>58</i>

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Recomendações de velocidades de corte para diferentes tipos de madeira.	14
Tabela 2 - Relação da qualidade do acabamento com o avanço por dente	16
Tabela 3 - Seleção do Material da Ferramenta	19
Tabela 4 - Dados das ferramentas.....	26
Tabela 5 - Dados da fresadora CNC	27
Tabela 6 - Resumo das operações de cada fresa	58
Tabela 7 - Resultados das operações.....	59
Tabela 8 –Preços das fresas utilizadas.....	66

1 Introdução

Até meados da década de 40, as guitarras eram feitas manualmente e em baixa escala, por profissionais especializados conhecidos como lutieres.

Com o desenvolvimento do comando numérico computadorizado, tornou-se possível a fabricação de peças com alto grau de complexidade e em larga escala. Logo, as primeiras guitarras feitas em comando numérico surgiram, e isso foi um fator determinante para a disseminação e popularização deste instrumento em pouco tempo. Este projeto detalhará a fabricação do corpo de uma guitarra em comando numérico.

1.1 Motivação

Como amante da música e multi-instrumentista, sempre fui fascinado por qualquer tipo de objeto capaz de produzir música, e por isso possuo uma série de instrumentos. Um dos meus maiores desejos sempre foi construir uma guitarra própria. A chance de poder unir esse desejo ao meu projeto de graduação em engenharia mecânica foi algo que me inspirou e motivou para esta realização.

1.2 Organização do Projeto

Este projeto está dividido em sete capítulos, incluindo a introdução. O capítulo dois aborda conceitos de usinagem de madeira que serão necessários para as operações de fabricação. O capítulo três apresenta a usinagem em comando numérico computadorizado. No capítulo quatro é descrito os preparativos para a operação de usinagem. É escopo do capítulo cinco descrever todo o processo de fabricação do corpo da guitarra, operação por operação. O capítulo seis é uma análise de custos envolvidos no processo de fabricação. E, por fim, no capítulo sete é apresentada uma conclusão sobre o trabalho.

1.3 A Guitarra Elétrica

A guitarra elétrica (mais conhecida apenas por guitarra) é um instrumento musical pertencente à família dos cordofones. Isto é, o som é produzido manualmente pela vibração das cordas, a exemplo do violão, porém é transformado em sinal elétrico através da ação de captadores magnéticos, localizados no corpo da guitarra,

normalmente embaixo das cordas. Esses sinais elétricos são amplificados e emitidos por um alto-falante que converte os sinais elétricos em ondas sonoras.

Existe também a possibilidade de se modificar o som antes dele ser emitido pelo alto-falante. Essa facilidade e diversidade em modificação do som foi o motivo pelo qual a guitarra ganhou tamanha popularidade e se tornou um instrumento presente em quase todos os tipos de música, principalmente no Rock, Blues, Jazz e Pop.

1.4 Componentes de uma guitarra elétrica

A guitarra elétrica atual é composta de uma série de componentes com funções distintas, que estão ilustrados na Figura 1.



Figura 1 - Componentes de uma guitarra

Os componentes, bem como suas funções, são explicitados a seguir:

- **Mão ou HeadStock** : É a parte da guitarra cuja função é segurar as cordas do instrumento. As cordas geralmente saem da ponte, passam pela pestana e são fixadas nas tarrachas, na mão do instrumento.
- **Tarrachas**: São usadas para afinar a guitarra através do ajuste de tensão das cordas e, conseqüentemente, a altura do som que elas produzem.
- **Pestana ou Capotraste**: Peça que separa a mão da escala. Aumentam a estabilidade da afinação.
- **Trastes**: Filetes metálicos que temperam a escala. São colocados de semi-tom em semi-tom.
- **Casas**: Espaço entre dois trastes.

- **Escala:** Superfície do braço onde são colocados os trastes
- **Corpo:** É o principal elemento de estrutura de uma guitarra. Normalmente é uma peça maciça de madeira onde são instalados os captadores, pontes, potenciômetros etc.
- **Captadores ou Pick-ups:** Dispositivo que tem como função captar e transformar ondas mecânicas em sinais elétricos. Podem ser passivos/ativos e simples/duplos.
- **Chave Seletora:** Troca o captador que está ativo
- **Potenciômetros:** Controlam o nível de ganho (volume) e timbre.
- **Escudo:** Peça normalmente de plástico responsável por proteger o corpo da guitarra de arranhões.
- **Ponte:** Peça responsável pela fixação das cordas ao corpo da guitarra.

A intensidade do som produzido depende respectivamente da intensidade de vibração das cordas, da proximidade das cordas do captador magnético, da qualidade e tipo de captador magnético, da quantidade de sinal eléctrico perdido nos cabos eléctricos, do nível de amplificação eléctrica e da qualidade e tipo do alto-falante, dentre outros fatores.

2 Usinagem da Madeira

Usinagem é um processo de fabricação mecânica onde uma peça é obtida através da retirada de cavacos de uma peça bruta, por meio de ferramentas adequadas.

A usinagem confere à peça uma precisão dimensional e um acabamento superficial que dificilmente podem ser obtidos por outro processo de fabricação. É por este motivo que a maioria das peças, mesmo quando obtidas através de outros processos, recebem um tratamento final de usinagem.

2.1 Movimentos e grandezas nos processos de usinagem

Os movimentos entre ferramenta e peça durante a usinagem são aqueles que permitem a ocorrência do processo de usinagem. Tais movimentos são considerados durante o projeto e a fabricação das máquinas-ferramentas que os realizarão. [2]

- **Movimento de corte:** É o movimento entre a ferramenta e a peça que provoca remoção de cavaco durante uma única rotação ou um curso da ferramenta
- **Movimento de avanço(f):** É o movimento entre a ferramenta e a peça que, juntamente com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua do cavaco ao longo da peça.
- **Movimento efetivo de corte:** É o movimento entre a ferramenta e a peça, a partir do qual resulta o processo de usinagem. Quando o movimento de avanço é contínuo, o movimento efetivo é a resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço.
- **Movimento de correção:** É o movimento entre a ferramenta e a peça empregado para compensar alterações de posicionamento devidas, por exemplo, pelo desgaste da ferramenta.
- **Movimento de aproximação:** É o movimento da ferramenta em direção à peça, com a finalidade de posicioná-la para iniciar a usinagem.
- **Movimento de recuo (*Retract*):** É o movimento da ferramenta pelo qual ela, após a usinagem, é afastada da peça.

A figura 2 mostra os movimentos de usinagem em uma operação de fresamento de topo.

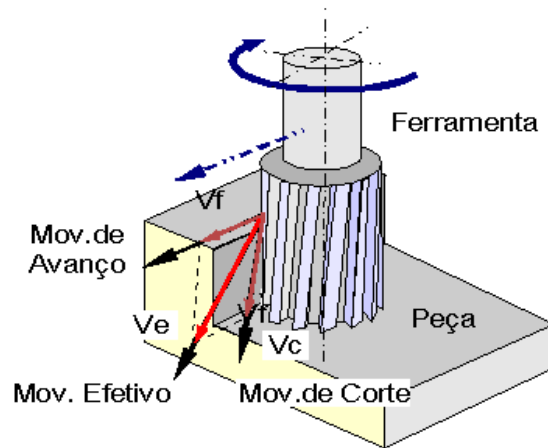


Figura 2 - Movimentos de usinagem

- **Profundidade de corte (a_p):** É o movimento entre a ferramenta e a peça, no qual é determinada a espessura da camada de material a ser removida.
- **Penetração de trabalho (a_e):** É a penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente à direção de avanço.

A figura 3 ilustra a profundidade de corte e a penetração de trabalho em uma operação de fresamento de topo.

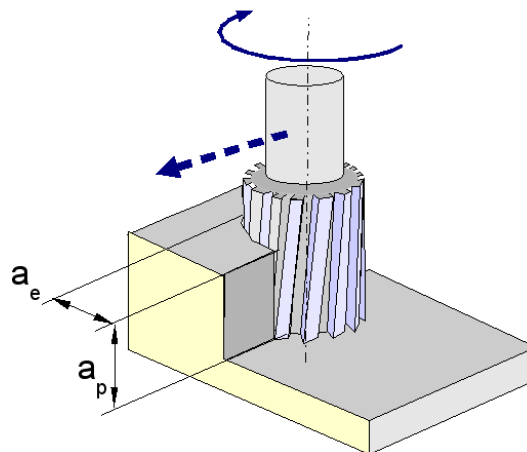


Figura 3 - Grandezas de Usinagem

2.2 Parâmetros de corte nos processos usados em madeira

São os parâmetros que definirão as características do corte. Eles variam de acordo com cada processo, material envolvido, tipo de ferramenta etc.

Velocidade de Corte

A velocidade de corte é o resultado do descolamento da ferramenta diante da peça. Ela é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça. [2]

A velocidade de corte pode ser calculada por:

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (2.1)$$

onde:

V_c = Velocidade de corte (m/min)

d = Diâmetro da ferramenta (mm)

n = Rotação da ferramenta (RPM)

Ou,

$$V_c = \frac{\pi d n}{12} \quad (2.2)$$

onde:

V_c = Velocidade de corte (pé/min)

d = Diâmetro da ferramenta (pol)

n = Rotação da ferramenta (RPM)

De acordo com Souza Jr [3] a tabela 1 relaciona as recomendações de valores da velocidade de corte para diferentes tipos de madeira e derivados. Estes valores variam de acordo com as propriedades do material a ser usinado, tais como densidade, dureza, tenacidade etc.

Tabela 1 - Recomendações de velocidades de corte para diferentes tipos de madeira.

Material	Velocidade de Corte (Vc m/min)	Velocidade de Corte (Vc pé/min)
Madeira de coníferas	70 a 100	229 a 328
Madeira de folhosas (macias a médias)	50 a 80	164 a 263
Madeira de folhosas muito duras	30 a 60	98 a 197
Aglomerado e compensado	40 a 70	131 a 229

Aglomerado denso ($d > 720\text{Kg/m}^3$)	35 a 50	115 a 164
Madeira comprimida ($900 < d < 1400\text{Kg/m}^3$)	30 a 60	98 a 197

Velocidade de Avanço

A velocidade de avanço pode ser calculada por:

$$V_f = fn = \frac{1000V_c}{\pi d} f \quad (2.3)$$

Onde:

f = avanço (mm)

V_f = velocidade de avanço (mm/min)

Avanço por dente

O avanço por dente é definido como o passo entre as marcas deixadas na madeira, marcas essas visíveis nas superfícies usinadas. O avanço por dente, por este motivo, se torna o fator que vai determinar o estado da superfície, isto é, quanto menor, melhor será o acabamento, porém maior será o desgaste da ferramenta.

A Figura 4, abaixo, ilustra o esquema do avanço por dente.

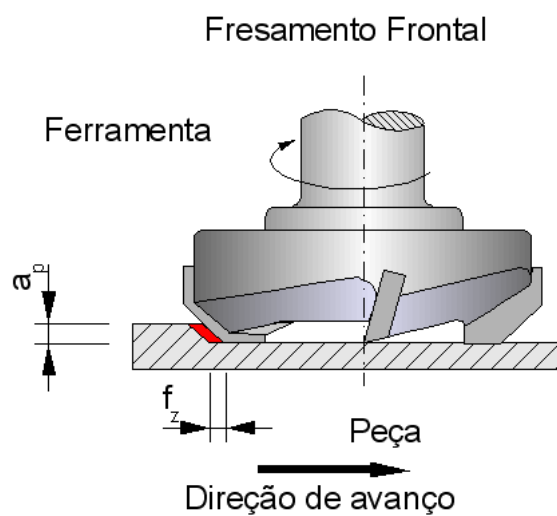


Figura 4 - Avanço por dente (f_z)

O avanço por dente é definido para cada processo, e pode ser relacionado com a velocidade de avanço através da seguinte relação:

$$f_z = \frac{f}{Z} = \frac{V_f}{nZ} \quad (2.4)$$

Onde:

f = avanço (mm ou pol)

f_z = avanço por dente (mm ou pol)

V_f = velocidade de avanço (mm/min ou pol/min)

n = Rotação (RPM)

Z = Número de dentes da ferramenta

De acordo com Sousa Jr [3], um avanço por dente recomendado para o fresamento da madeira deve estar na faixa de 1mm a 1,8 mm (0,04pol a 0,07pol). Esse intervalo corresponde a faixa entre a melhor relação “qualidade/desgaste”. A tabela 2 relaciona a qualidade do acabamento nas fresas em função dos valores de avanço por dente.

Tabela 2 - Relação da qualidade do acabamento com o avanço por dente

Avanço por dente (fz) (mm/dente)	Avanço por dente (fz) (pol/dente)	Qualidade do acabamento
0,3 a 0,8	0,011 a 0,031	Fino
0,8 a 2,5	0,031 a 0,098	Médio
2,5 a 5,0	0,098 a 0,196	Grosso

2.3 Fresamento

O Fresamento é a operação de usinagem em que material é removido por uma fresa, uma ferramenta giratória de múltiplos dentes cortantes. Cada dente remove uma pequena quantidade de material em cada revolução que o eixo onde a ferramenta é fixada executa.

Podemos classificar a operação fresamento em duas maneiras, segundo a disposição dos dentes ativos da fresa.

- Fresamento tangencial: Operações nas quais os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta – o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo usinada. As fresas são denominadas fresas tangenciais ou cilíndricas.

- Fresamento frontal: Operações nas quais os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta – o eixo da fresa é perpendicular à superfície usinada. As fresas são denominadas de fresas frontais ou de topo.

A Figura 5 ilustra as diferenças entre fresamento tangencial e fresamento frontal.

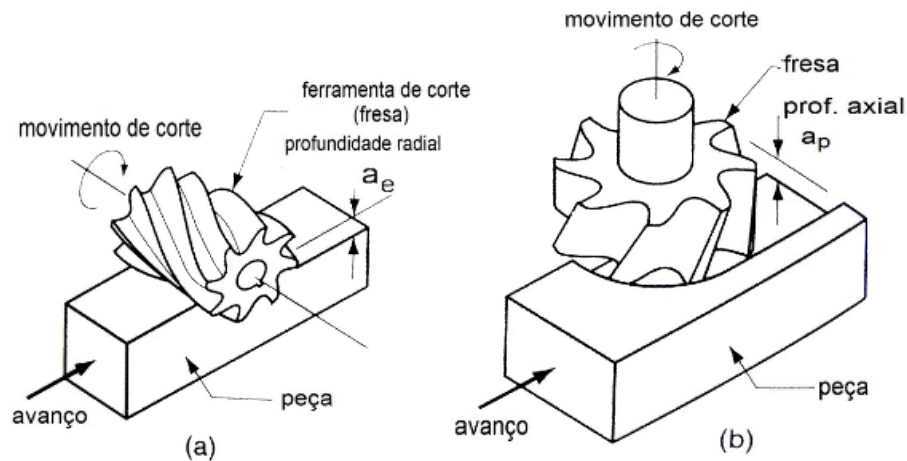


Figura 5 – Tipos fundamentais de fresamento

As características construtivas de uma fresa de topo, bem como sua geometria, são ilustradas na Figura 6.

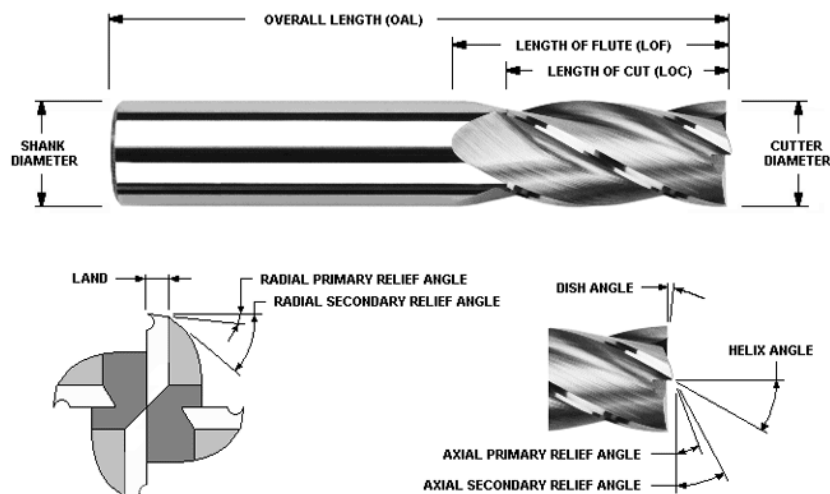


Figura 6 - Geometria de uma fresa de topo

Entre elas, é interessante descrever algumas:

- **Haste (Shank)** – É a parte cilíndrica da ferramenta que é usada para fixar e prender a ferramenta no suporte. A haste pode ser presa por atrito ou aparafusada no suporte. Em algumas fresas, seu diâmetro pode ser diferente do diâmetro de corte, para que possa ser fixada a um suporte padrão.
- **Canais/Dentes (Flute/Tooth)** – Os canais de uma fresa são estrias helicoidais oriundas da ponta de corte. A lâmina afiada de uma das bordas dos canais são os dentes. Os dentes cortam o material, e o cavaco é empurrado ao longo dos canais através do movimento de rotação da fresa.
- **Ângulo de Hélice (Helix Angle)** - Os canais de uma fresa de topo são em sua maioria helicoidais. Se fossem retos, toda a superfície da ferramenta iria impactar no material ao mesmo tempo, o que causaria vibrações, reduziria a precisão e a qualidade de acabamento. Dispondo os canais em ângulos, permite à ferramenta penetrar no material gradualmente.
- **Diâmetro de corte (Cut Diameter)** – É o diâmetro da parte da ferramenta que realiza o corte.

As fresas de topo ainda podem ser divididas de acordo com a geometria da ponta. Para esse projeto serão utilizados dois tipos de fresas de topo. A fresa de topo reto e a fresa de topo esférico. Fresas de topo reto são fresas apropriadas para operações de abertura de cavidade e contorno. O acabamento final dessas operações não é tão importante. Já as fresas de topo esférico são fresas apropriadas para operações onde se busca um acabamento fino da superfície usinada. A Figura 7 ilustra a diferença da geometria entre as fresas de topo reto e esférico.

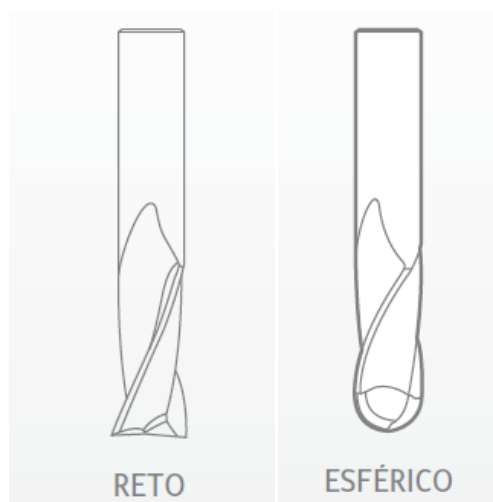


Figura 7 – Tipos de fresa de topo

2.3.1 Material da Ferramenta

Para a seleção criteriosa do material da ferramenta, uma série de fatores deve ser ponderada, dentre os quais o material a ser usinado, o processo de usinagem, a condição da máquina operatriz, a forma e as dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e de operação entre outros.

Alguns dos requisitos desejados em uma ferramenta de corte são:

- Resistência a compressão
- Dureza
- Resistência à flexão e tenacidade
- Resistência à oxidação
- Resistência do gume
- Resistência interna de ligação
- Resistência a quente
- Pequena tendência à fusão e caldeamento
- Resistência à abrasão

Entretanto, não existe nenhum material capaz de reunir todas essas características. Por isso é necessário uma seleção criteriosa do material da ferramenta, onde uma série de fatores deve ser ponderada. A tabela 3, de acordo com Stoeterau [4], especifica o material de ferramenta mais apropriado para cada tipo de material e processo.

Tabela 3 - Seleção do Material da Ferramenta

Material da peça	Material da ferramenta
Aço	Aços rápidos e metais duro P15 a P40
Ferro fundido, metais não ferrosos, plásticos, madeiras e aços temperados	Metais duro K10 a K30
Aços HB<300	Cermets
Desbaste de ferro fundido	Cerâmicas de Si ₃ N ₄
Ferro fundido cinzento, ferro fundido duro, aços para cementação, aços de beneficiamento, aços temperados	Cerâmicas óxidas mista
Aços para beneficiamento de alta resistência (HRC > 45)	CBN

3 O Comando Numérico Computadorizado

O comando numérico é hoje o processo mais dinâmico para a fabricação de peças, constituindo um dos maiores desenvolvimentos para a automação de máquinas e para a usinagem. O comando numérico exige um investimento inicial maior, pois suas máquinas são muito mais caras quando comparadas à máquinas de usinagem convencionais. Entretanto, quando a aplicação é bem estruturada, o investimento é rapidamente compensado devido às inúmeras vantagens do processo, tais como:

- Menor tempo de fabricação;
- Projeto de peças mais complexas;
- Maior qualidade do produto final;
- Maior eficiência.

Embora o princípio de usinagem seja o mesmo, a maneira de se trabalhar em CNC é diferente da maneira convencional.

Na usinagem convencional o operário é o principal elemento do sistema de produção. Cabe a ele grande parte, as vezes todas, as decisões sobre a execução do processo.

Para a fabricação da peça o operário receberá como informação inicial:

- Ordem de produção;
- Desenho da peça;
- Ferramentas a serem utilizadas.

Com base nessas informações, cabe ao operário tomar todas as decisões remetentes ao processo de fabricação. Logo, a eficiência do processo está nas mãos da perícia do operador. Cursos de aprimoramento e experiência obtida ao longo dos anos são essenciais para o operador, na usinagem convencional. Já na usinagem em CNC, existe um número de informações muito maior, tais como:

- A documentação da peça a ser usinada, entre elas:
 - Desenhos;
 - Planos de Fixação;
 - Lista de Ferramentas.
- Dispositivos de fixação e instrumentos de medição;

- Programa CNC, contendo dados de corte, sequencias de movimentos, funções auxiliares e etc.
- Ferramentas montadas e posicionadas no porta-ferramentas da máquina.

Na usinagem em CNC, as responsabilidades do operador são muito menores. As tarefas de interpretação e decisão são realizadas antes do processo de usinagem, pelo projetista e/ou pelo programador de CNC.

4 Projeto da fabricação

O projeto do corpo da guitarra leva em consideração uma série de fatores, procedimentos, materiais e equipamentos necessários para o desenvolvimento do mesmo. Neste capítulo será descrito a guitarra selecionada, o material da matéria prima, as ferramentas e máquinas utilizadas, a fixação da matéria prima na máquina, procedimentos de segurança contra fogo etc.

4.1 A Guitarra Selecionada

A seleção da guitarra para esse projeto foi feita levando-se em conta características como formato, dimensões e material.

4.1.1 Formato

A escolha do formato da guitarra não se limita somente ao fator estético. Ela desempenha uma grande parcela no som final da guitarra também. Não existe formato melhor ou um som melhor. O que existem são formatos e sons diferentes, que de acordo com o gosto e estilo do músico, pode ser mais bonito para um do que para outros. Alguns dos tipos mais comuns de formatos de guitarra estão apresentados na figura 8.

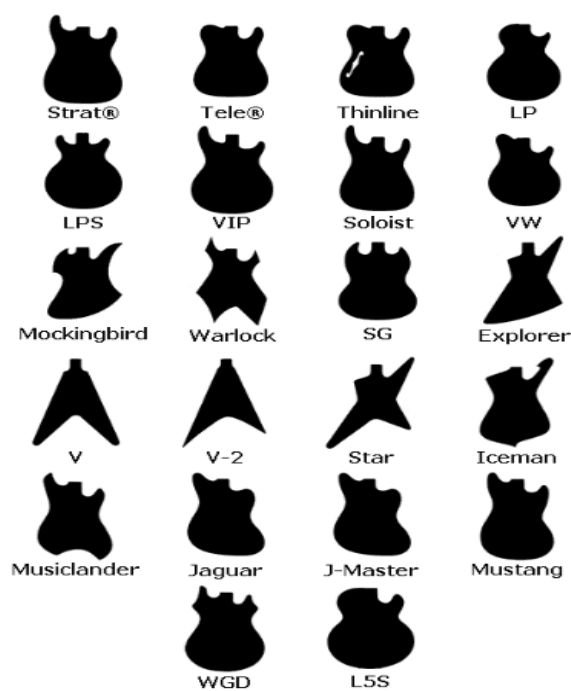


Figura 8 - Formatos de Guitarra

Para esse projeto, será utilizado o formato clássico da guitarra Fender Stratocaster [9], ilustrada na Figura 9.



Figura 9 - Fender Stratocaster

4.1.2 Material

A madeira é essencial no som do instrumento. O tipo de madeira escolhido influenciará diretamente no tipo de som que o instrumento emitirá. A densidade da madeira e a forma como as fibras da madeira são dispostas alteram o som do instrumento. No som de uma guitarra, o que caracteriza o timbre é a ressonância com que as cordas conseguem “provocar” a madeira. Essa ressonância mantém o som ecoando por um certo período de tempo. É o chamado *sustain*.

É fundamental também fazer a escolha adequada na hora de combinar a madeira do braço com a madeira do corpo da guitarra. Geralmente, é usada uma madeira mais leve para o corpo, e outra mais densa para o braço, para evitar que a guitarra fique excessivamente pesada e ser desconfortável para quem a toca. A escolha da madeira será determinante no resultado final do instrumento.

Uma vez escolhida o tipo de madeira que será trabalhada, é fundamental que seja utilizado uma madeira impecável, livre ao máximo de falhas. Ao cortar a madeira que será utilizada, deve-se corta-la perpendicularmente à árvore que estava plantada na natureza. Isso porque as fibras devem estar no mesmo sentido da guitarra, caso contrário seria muito difícil trabalhar a madeira.

4.1.3 O Mogno Amazônico

Para esse projeto, será utilizado o do mogno da Amazônia [10]. A escolha dessa madeira deu-se devido ao fato do mogno reunir algumas características tais como:

- Boa comercialização;
- Boa trabalhabilidade com ferramentas mecânicas;
- Bom acabamento final, produzindo superfície lisa e brilhante;
- Uso recorrente em instrumentos musicais, devido ao bom timbre que produz;

4.1.4 Modelo 3D da Guitarra

Foi desenvolvido no SolidWorks um modelo 3D para a guitarra Fender Stratocaster a partir de um modelo inicial obtido na internet. Este está de acordo com as dimensões fornecidas pela fabricante Fender [9].

Esse modelo, ilustrado na Figura 10, será exportado e lido no Mastercam, onde ocorrerão as operações de usinagem para a fabricação da guitarra.



Figura 10 – Modelo 3D do corpo de uma Fender Stratocaster

4.1.5 Corpo

O corpo desta guitarra consiste em uma peça maciça de madeira. A guitarra tem 18,14" x 12,65" x 1,75" de dimensões, como mostrado na figura 11.

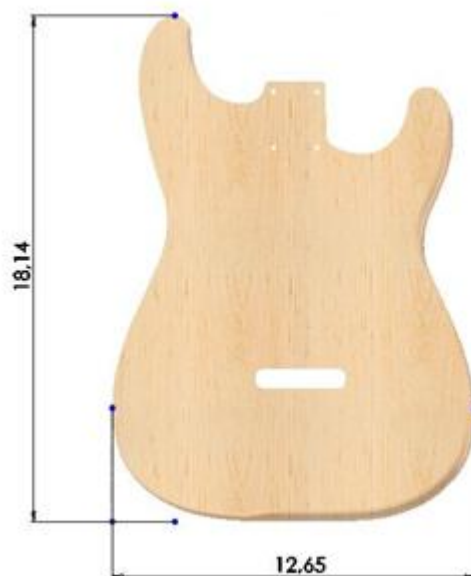


Figura 11 – Dimensões do Corpo

O desenho técnico da guitarra é mostrado no Anexo III.

4.2 Materia Prima (Stock)

Para obter-se o perfil da guitarra desejado, um bloco de 20"x15"x 1,75" de mogno da Amazônia será utilizado, conforme indicado na figura 12. É importante garantir o paralelismo e planicidade do bloco, por isso tolerâncias de fabricação são necessárias, conforme o desenho técnico do anexo IV indica.



Figura 12 – Dimensões do bloco de Madeira (Stock)

4.3 Seleção das ferramentas utilizadas

É preciso fazer a escolha das ferramentas de maneira apropriada. Da tabela 3 seleciona-se o material das ferramentas, para esse processo será Metal duro do Grupo K10 a K30. De acordo com Stoeterau [4], o Grupo K possui as seguintes características.

- Pouca resistência ao quente
- Alta resistência ao desgaste
- Usinagem de materiais com cavacos curtos, fofo, metais não ferrosos, materiais não metálicos (pedra, madeira, etc)

É importante destacar que não poderia haver escolha mais apropriada para o material. Não há necessidade para resistência ao quente, visto que a madeira aquece pouco durante o processo. (Capítulo 5.6) É interessante uma alta resistência ao desgaste, pois desse modo, a vida da ferramenta será alta. E por fim, a madeira gera cavacos curtos (serragem). Portanto, as ferramentas necessárias para a usinagem dessa guitarra serão:

Fresa 1. Fresa 1/4" de topo reto (Flat End Mill)

Fresa 2. Fresa 1/4" de topo esférico (Ball Nose End Mill)

Fresa 3. Fresa 1/8" de topo reto (Flat End Mill)

A tabela 4 detalha os parâmetros de cada uma das ferramentas, de acordo com os dados do fabricante American Carbide [12]

Tabela 4 - Dados das ferramentas

Nº da Ferramenta	Tipo de Fresa	Nº de Dentes	Diâmetro de Corte	Comprimento do canal	Comprimento Total	Diâmetro da haste
1	Reta	2	1/4"	3/4"	2 1/2"	1/4"
2	Esférica	2	1/4"	3/4"	2 1/2"	1/4"
3	Reta	2	1/8"	3/4"	2"	1/8"

4.4 Seleção e dados da fresadora CNC

A fresadora CNC escolhida para execução do processo foi aquela que atendia todas as exigências do projeto de maneira mais apropriada.

Foi escolhida a fresadora CNC NC-R1325 , do fabricante Nice-Cut, especializada em cortes de madeira. Há espaço para alocação de até quatro ferramentas, com trocas automáticas das mesmas. A tabela 5 resume as especificações técnicas da fresadora, de acordo com o fabricante Nice-Cut [13], como dimensões, potência, RPM etc.

Tabela 5 - Dados da fresadora CNC

Nº	Descrição	Parâmetro
1	X,Y,Z Área de trabalho	1320x2530x200mm (52x100x7.8pol)
2	Tamanho da mesa	1440x3040 mm (56.7x119.7pol)
3	X,Y,Z Acurácia de posicionamento	±0,03/300mm
4	X,Y,Z Acurácia de reposicionamento	±0,05mm
5	Consumo máximo	6,5Kw
6	Velocidade máxima de deslocamento	0-32000mm/min (0-1260 pol/min)
7	Velocidade máxima de trabalho	0-20000mm/min (0-787.5pol/min)
8	Potencia do motor	3,0Kw
9	Faixa de Rotação	0-18000RPM
12	Sistema operacional	DSP System (Option: Mach3 PC Software)
13	X,Y Sensibilidade de trabalho	<0,01mm
14	Software	Type3 software, Artcam software, Mastercam software
15	Condições de Operação	Temperatura: 0°C~45°C Umidade relativa : 30%~75%
16	Dimensões	3200X1950X1950mm
17	Peso líquido	900KG
18	Peso total	1150KG

Os eixos de coordenadas em uma fresadora CNC, são definidos da seguinte forma:

EIXO Z: Deve ser o primeiro a ser definido. A convenção adotada é identificar o eixo Z como o eixo de rotação principal que fornece a velocidade de corte. Em um centro de usinagem é o eixo do mandril.O sentido positivo do eixo Z é aquele para a qual a ferramenta se afasta da peça

EIXO X: Normalmente horizontal e paralelo a superfície de fixação da peça.

EIXO Y: Para máquinas com os 3 eixos, o eixo Y será aquele que forma ângulos reto com os eixos Z e X.

A orientação dos eixos da fresadora CNC utilizada nesse projeto é ilustrada na figura 13.

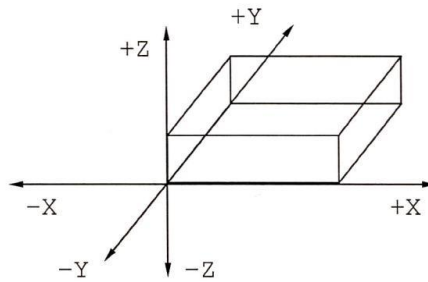


Figura 13 - Orientação dos eixos da fresadora CNC

4.5 Métodos De Posicionamento

Método Absoluto – G90 : Define-se uma origem. E todas as dimensões são tomadas a partir dela, de maneira absoluta. Caso um erro aconteça, ele só acontecerá na operação em que foi cometido.

Método Incremental – G91: Cada parte da peça é dimensionada a partir da coordenada anterior. Se um erro é cometido, ele é propagado até o fim da operação.

Para este projeto, será adotado o método absoluto G90.

4.6 Fixação da matéria prima

A fixação do bloco de madeira maciça será feita através de quatro grampos em suas extremidades, e escorado em um gabarito, que possuirá quatro furos, coincidente com os furos do braço da guitarra, para que não haja perda de referencia na hora da virada do bloco para usinar a parte de trás da guitarra. Além disso, um pequeno bloco de MDF será colocado entre a mesa da máquina, e o bloco de mogno, para evitar que a ferramenta colapse com a mesa no momento do corte.

4.7 Temperatura e proteção contra fogo

A ignição da madeira se inicia quando ela for submetida a suficiente calor, e em atmosferas que possuam oxigênio suficiente. A ignição pode ser de dois tipos: Com ou sem piloto. Ignições com piloto ocorrem na presença de alguma fonte de ignição (como faísca ou chama). Já a ignição sem piloto ocorre sem nenhuma fonte de ignição. A superfície da madeira é inflamada pelo fluxo de energia, ou pelo fluxo de

calor de algum objeto aquecido. Este fluxo de energia pode ter componentes condutivos e/ou convectivos e/ou radioativos.

Ignições sem piloto dependem de circunstâncias especiais que resultam em diferentes faixas de temperaturas de ignição. Até este momento, não é possível fornecer informação específica sobre temperaturas de ignição, que abrangem um largo numero de casos. Para transferências de calor através de radiação em madeira, está relatado na literatura, uma temperatura de ignição a partir dos 600°C. Em transferências de calor por convecção e/ou condução, está relatado temperaturas de ignição tão baixas como 270°C e tão altas como 470°C. Portanto, o maior problema é a questão da temperatura de trabalho de segurança.

Temperaturas entre 100°C e 150°C têm sido recomendadas como temperaturas de superfície seguras para se trabalhar em madeiras. [11]

Baseado em experiências de fabricantes de guitarras, a temperatura de superfície da madeira não chega ser um problema no processo de usinagem.

Em operações com condições próximas as descritas nesse projeto, a temperatura da madeira dificilmente ira ultrapassar temperaturas acima de 60°C, o que é muito abaixo da faixa de segurança recomendada pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) .Até por não ser um problema e uma dificuldade encontrada pelos fabricantes, existe pouco estudo sobre esse assunto. Logo não há necessidade do uso de fluido de refrigeração no processo.

Uma vez tendo feito os preparativos, selecionado máquina e ferramentas apropriadas e tomado os cuidados necessários de segurança, pode-se iniciar o processo de fabricação do corpo da guitarra.

5 Descrição do Processo de Fabricação

Aqui será descrito todo o processo de fabricação do corpo da guitarra. Entre as informações deste capítulo estão:

- Preparação do programa Mastercam;
- Parâmetros de corte utilizados;
- Movimentos de usinagem utilizados;
- Descritivo de cada operação do processo;
- Resultados obtidos.

A usinagem do corpo da guitarra será toda projetada e maquinada no programa MasterCam.

5.1 Configurações Iniciais

5.1.1 Preparação em SolidWorks

A fim de facilitar a orientação de eixos, a definição da origem e a criação do bloco de usinagem no Mastercam, será feita uma superfície ainda em Solidworks.

Essa superfície consistirá em uma espécie de moldura, com as dimensões externa do bloco de madeira que será usinado, e as dimensões internas com as dimensões da externa subtraídas de 0,25 polegadas (diâmetro da fresa utilizada).

5.1.2 Definição do Tipo de Centro de Usinagem

Define-se o tipo de Centro de Usinagem que será usado na fabricação do projeto.

Desse modo, o Mastercam saberá as limitações da máquina disponível. No caso do projeto será usado uma fresadora de 3 eixos.

5.1.3 Orientação e Origem

É preciso orientar os eixos no Mastercam de modo que eles coincidam com os eixos do Centro de Usinagem, como mostrado na Figura 14.

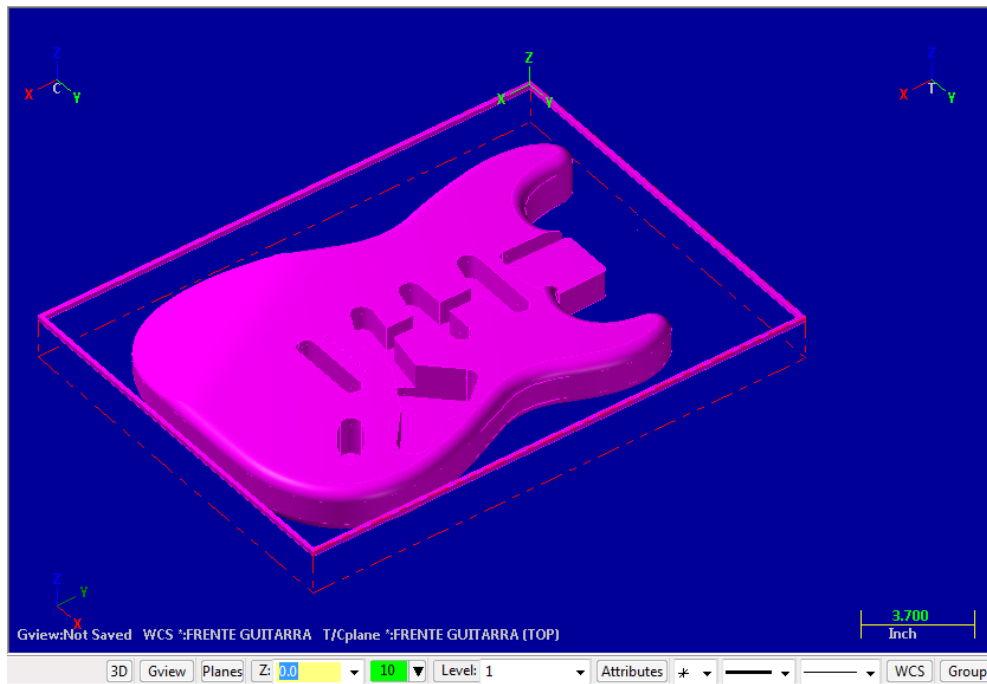


Figura 14 - Orientação dos eixos no Mastercam

5.1.4 Bloco de Usinagem (Stock)

Informa-se ao Mastercam as dimensões do bloco de usinagem que será utilizado para usinagem. A janela para especificar essas dimensões pode ser vista na Figura 15, a seguir:

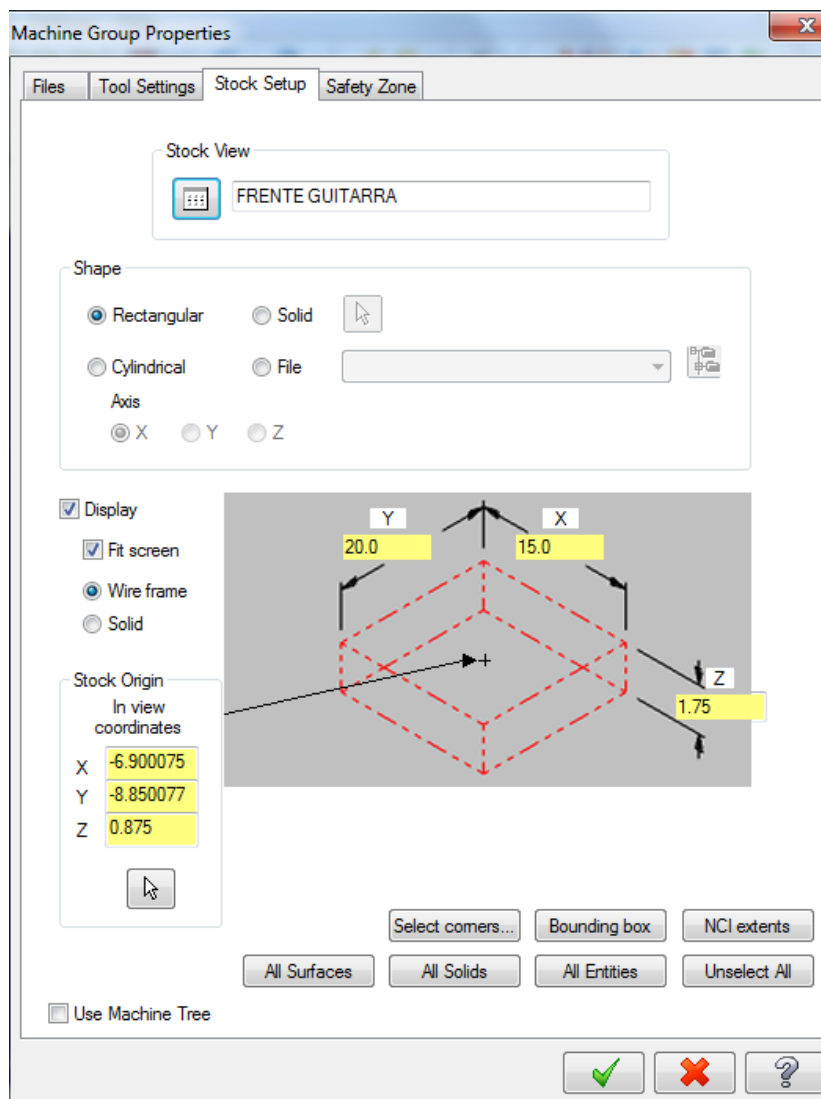


Figura 15 - Stock

5.1.5 Parâmetros de corte

Esta é a etapa onde serão definidos os dois parâmetros mais importantes de corte: A velocidade de corte e o avanço por dente. É preciso definir esses parâmetros com inteligência, pois eles serão determinantes no sucesso ou fracasso do projeto.

Define-se a velocidade de corte do processo baseado nas faixas de velocidades da tabela 1. Para madeiras folhosas, como o caso do Mogno Amazônico, a faixa recomendada está 165 a 263 pés/min. Para esse projeto portanto, será considerada uma velocidade de corte de 250 pés/min.

A equação 2.2 permite calcular a rotação necessária para atingir a velocidade de corte determinada em função do diâmetro da ferramenta.

$$V_c = \frac{\pi d n}{12} \quad \xrightarrow{\text{logo}} \quad n = \frac{12 V_c}{\pi d}$$

Logo:

$$n_{fresa1} = 3820 \text{ RPM}$$

$$n_{fresa2} = 3820 \text{ RPM}$$

$$n_{fresa3} = 7640 \text{ RPM}$$

Baseado na tabela 2, define-se o avanço por dente em $f_z = 0,03 \text{ pol}$ para as fresas 1 e 3. Para os fresamentos de superfície, em que se busca um acabamento final de melhor qualidade, o avanço por dente será definido em $f_z = 0,025 \text{ pol}$.

Assim,

$$f_{zfresa1} = 0.03 \text{ pol}$$

$$f_{zfresa2} = 0.025 \text{ pol}$$

$$f_{zfresa3} = 0.03 \text{ pol}$$

A equação 2.4 permite calcular a velocidade de avanço a partir do avanço por dente, o número de dentes da ferramenta e a rotação.

$$f_z = \frac{V_f}{\eta Z} \quad \xrightarrow{\text{logo}} \quad V_f = f_z \eta Z$$

Logo:

$$V_{fresa1} = 229.18 \text{ pol/min}$$

$$V_{fresa2} = 190.98 \text{ pol/min}$$

$$V_{fresa3} = 458.4 \text{ pol/min}$$

Nota: Pode-se informar ao Mastercam o material que será usinado, o material da ferramenta utilizada e os parâmetros da ferramenta. Desse modo, o próprio Mastercam calcula as taxas de avanço e as velocidades de corte mais adequadas para cada operação. Entretanto, essas taxas e velocidades podem exceder a capacidade da máquina, exigindo adaptações e recálculos. Esses valores gerados

pelo Mastercam em conjunto com as tabelas 1 e 2, permitem uma boa base para as definições dos parâmetros de corte que serão empregados no processo.

5.2 Operações e Movimentos

Para a fabricação do corpo da guitarra são necessários uma série de operações e movimentos de usinagem diferentes.

5.2.1 Tipos de Operações utilizadas

Serão utilizados cinco tipos de operações diferentes para a fabricação deste corpo de guitarra. Os nomes das operações, bem como suas características são descritos abaixo.

- **Abertura de cavidade (*Pocketing*):** Operação de fresamento com a finalidade de se criar cavidades com geometrias variadas.
- **Furação (*Drilling*):** Operação de furação.
- **Desbaste *Surface Rough*:** Operação de fresamento com a finalidade de se criar superfícies com acabamento final grosso.
- **Acabamento (*Surface Finish*):** Operação de fresamento com a finalidade de se criar superfícies com acabamento final fino.
- **Contorno (*Countour*):** Operação de fresamento com a finalidade de se cortar material seguindo um contorno determinado.

5.2.2 Lista das Operações

Para a fabricação deste corpo de guitarra serão necessárias 27 operações, listadas, em ordem, abaixo:

Parte da frente da guitarra:

1. Fixação da matéria prima na mesa da fresadora
2. Abertura da cavidade da parte elétrica
3. Abertura da cavidade do cabo
4. Abertura da cavidade dos captadores
5. Abertura de cavidade dos furos do braço
6. Furação da estrutura de fixação da ponte

7. Abertura da cavidade do braço da guitarra
8. Desbaste da zona de conforto 1
9. Acabamento da zona de conforto 1
10. Desbaste da zona de conforto 2
11. Acabamento da zona de conforto 2
12. Desbaste da lateral superior 1
13. Acabamento da lateral superior 1
14. Desbaste da lateral superior 2
15. Acabamento da lateral superior 2
16. Desbaste da lateral superior 3
17. Acabamento da lateral superior 3

Parte de trás da guitarra:

18. Virar a matéria prima para usinagem da parte de trás da guitarra
19. Fixação da
20. Abertura da cavidade da ponte
21. Abertura da cavidade do sistema de alavanca
22. Desbaste da zona de conforto 3
23. Acabamento da zona de conforto 3
24. Desbaste da zona de conforto 4
25. Acabamento da zona de conforto 4
26. Desbaste da lateral inferior 1
27. Desbaste da lateral inferior 2
28. Acabamento da lateral inferior 1
29. Acabamento da lateral inferior 2
30. Contorno do perímetro da guitarra

5.2.3 Movimentos Utilizados

Alguns movimentos peculiares ocorrerão no processo de fabricação da guitarra, eles são de importância e serão descritos, com suas características e funções explicadas.

- **Movimento de Rampa (*Ramp move*)** - Para as operações de fresamento de cavidade (*pocketing*), em que cavidades serão criadas no bloco de madeira, é

interessante tomar certo cuidado com a maneira em que a ferramenta irá penetrar na madeira.

Caso nada seja especificado, a ferramenta irá adentrar à madeira de forma vertical (mergulho), em um único passo, até atingir a profundidade de corte do processo em questão. Isto pode ser bastante ruim para a vida da ferramenta.

A Figura 16 ilustra o movimento de mergulho.

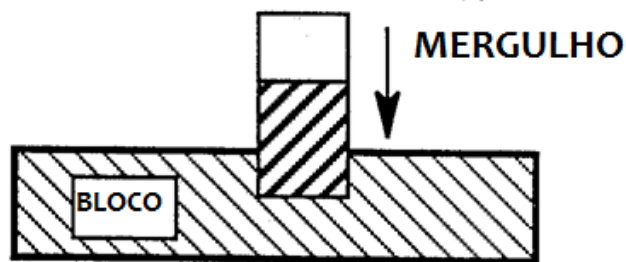


Figura 16 - Movimento de mergulho

Um modo de contornar esse problema, é o chamado movimento de rampa, e pode ser observado na Figura 17.

Esse movimento consiste numa penetração em zigue-zague da ferramenta na madeira, através de ângulos estipulados, até que se chegue a profundidade de corte do processo, e, partir desse ponto, inicia-se a operação de abertura de cavidade (*pocketing*).

O valor do ângulo de zigue-zague utilizado nos processos de abertura de cavidade desse projeto é de 10°. Este valor foi estipulado após diversas simulações em Mastercam com valores diferentes para o ângulo de zigue-zague até se chegar em um ângulo apropriado.

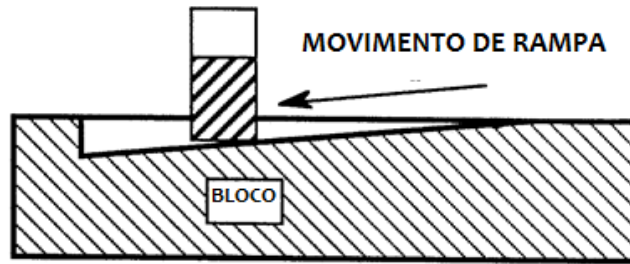


Figura 17 - Movimento de Rampa

- **Passo (Stepover)** - O passo pode ser definido como a distancia em que a ferramenta move-se entre duas superfícies de usinagem (*toolpaths*) adjacentes. O valor usual do *passo* para fresas de topo reto é cerca de 70%. Isto é, tome como exemplo uma fresa de 10mm de diâmetro. Ao fim de um *toolpath*, a ferramenta ira deslocar-se 7mm antes de começar o *toolpath* seguinte. O valor do passo está diretamente ligado com o acabamento final da superfície. Quanto menor o valor, melhor o acabamento final.

Nota: Quando se estiver usinando usando uma fresa de topo esférico, o valor do passo é menor, sendo medido usualmente em valores absolutos, e não percentuais, como no caso das fresas de topo reto.

- **Altura de cristas (Scallop Heights)** – As alturas de cristas podem ser definidas como as alturas de material salientes, remanescentes do processo. Essas alturas estão diretamente relacionadas com o diâmetro da ferramenta utilizada e com o valor do passo radial (*stepover*). Elas podem ser expressas pela seguinte relação:

$$Ac = \left(\sqrt{r^2 - \left(\frac{ae^2}{2} \right)} \right) - r \quad (5.1)$$

Onde:

Ac = Altura das cristas (mm/pol)

r = Raio da ferramenta (mm/pol)

ae = Passo Radial (mm/pol)

A figura 18 ilustra o cálculo trigonométrico da altura das cristas.

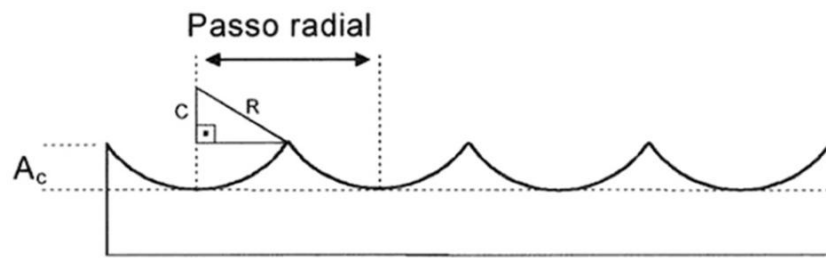


Figura 18 - Cálculo Trigonométrico das alturas de crista

Em termos práticos, um passo radial muito pequeno, usando uma fresa de topo esférico, irá resultar em uma rugosidade pequena, e por consequência uma superfície muito mais bem acabada e suave. As Figuras 19 e 20 comparam a rugosidade para dois processos diferentes em que se utiliza a mesma fresa, variando apenas o passo.

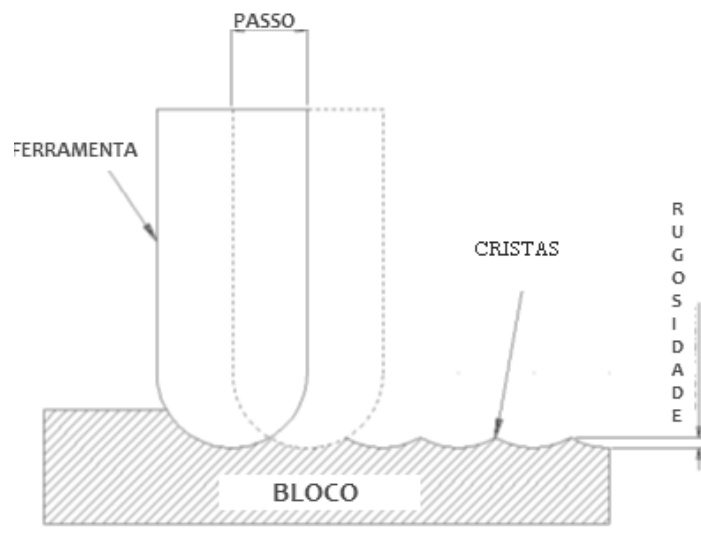


Figura 19 - Altura das cristas para um passo radial (stepover) maior

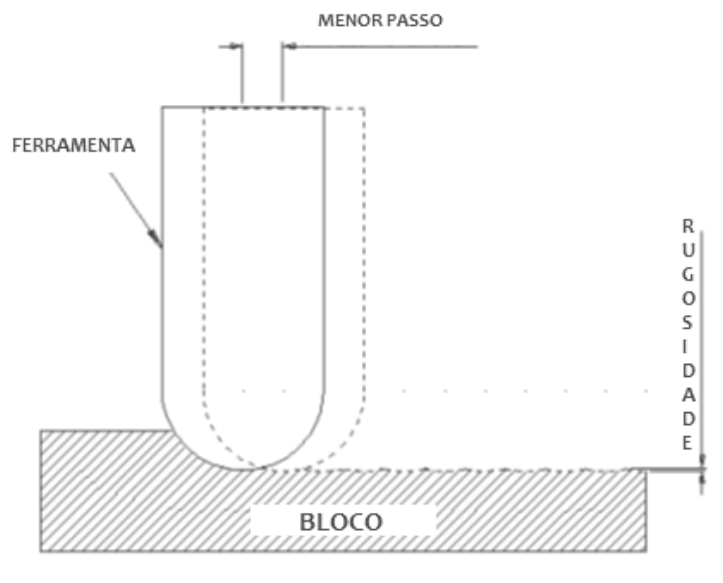


Figura 20 - Altura das cristas para um passo radial(stepover) menor

5.3 Fabricação da guitarra

5.3.1 Operação 1: Abertura da cavidade da parte elétrica

A primeira das operações consistirá no fresamento da cavidade da parte elétrica. Nesta cavidade serão alocados os fios, potenciômetros, chave seletora etc. A fresa que fará essa operação será a fresa nº1. A penetração da ferramenta será em movimento de rampa com ângulo de Zigue-Zague de 10° . O passo é de 70% (0,175"). A figura 21 mostra a simulação da cavidade da parte elétrica no modelo 3D e a figura 22 ilustra a simulação da sua abertura.

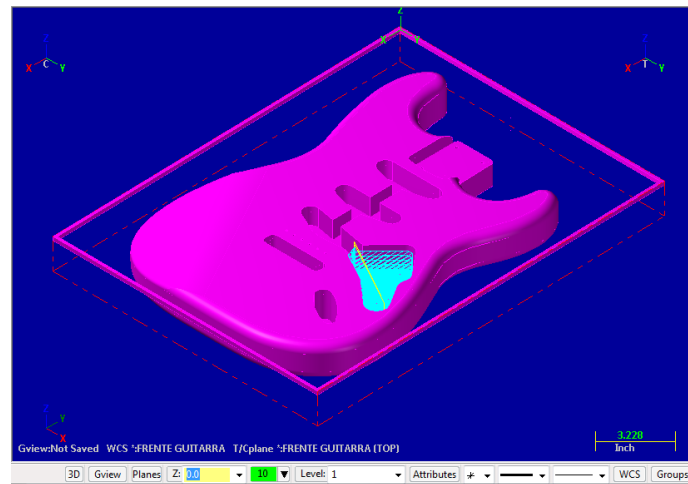


Figura 21 - Cavityda da parte elétrica no modelo 3D

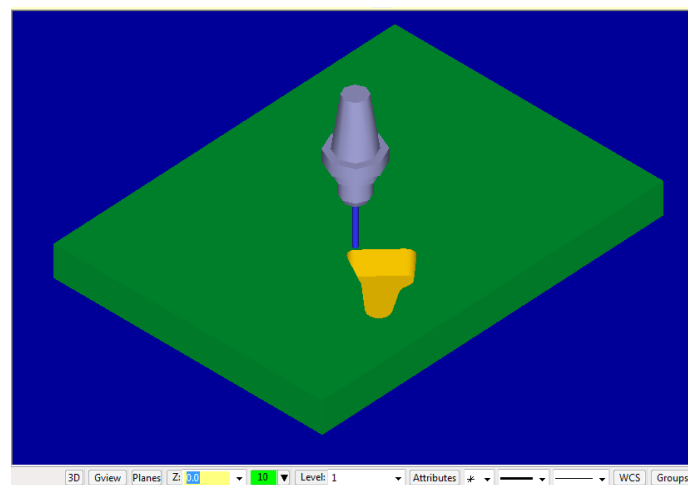


Figura 22 - Simulação da abertura da cavityda da parte elétrica

5.3.2 Operação 2: Abertura da cavitydo do cabo

Esta etapa será fresamento da cavitydo do cabo da guitarra. A fresa que fará essa operação será a fresa nº1. A penetração da ferramenta será em movimento de rampa com ângulo de Zigue-Zague de 10°. O passo é de 70% (0,175"). As Figuras 22 e 23 ilustram, respectivamente, a cavitydo do cabo no modelo 3D e a simulação da sua abertura.

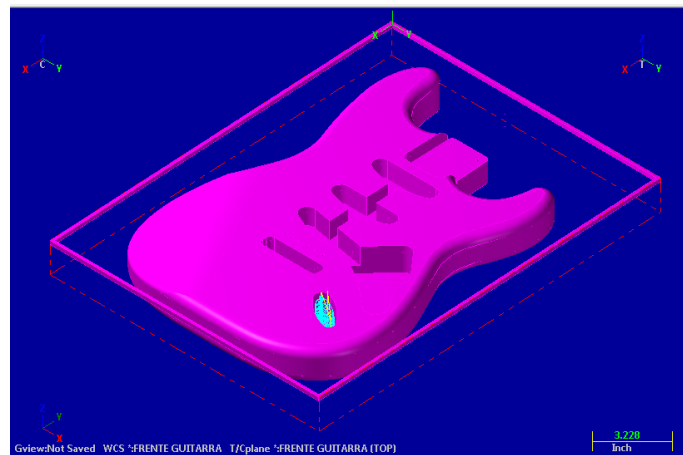


Figura 23 - Cavidade do cabo no modelo 3D

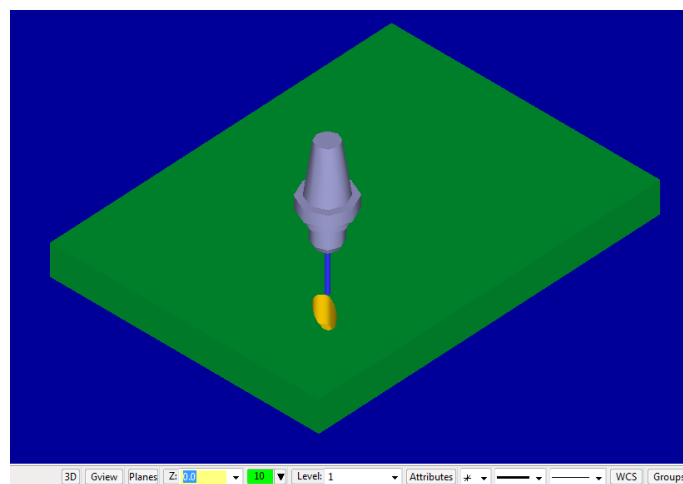


Figura 24 – Simulação da abertura da cavidade do cabo

5.3.3 Operação 3: Abertura da cavidade dos captadores

Nesta operação será realizado o fresamento da cavidade onde os captadores serão alocados. A configuração desta guitarra permite a instalação de 3 captadores simples.

A fresa que fará essa operação será a fresa nº1. A penetração da ferramenta será em movimento de rampa com ângulo de Zigue-Zague de 10°. O passo é de 70% (0,175"). As Figuras 25 e 26 mostram respectivamente a cavidade dos captadores e a sua abertura no modelo 3D.

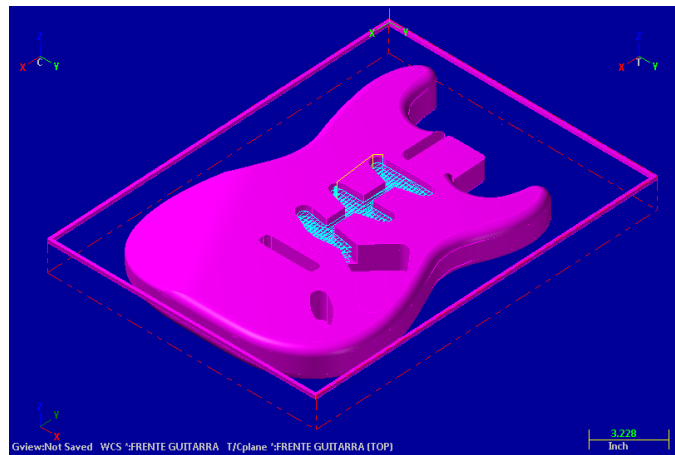


Figura 25 - Cavidade dos captadores no modelo 3D

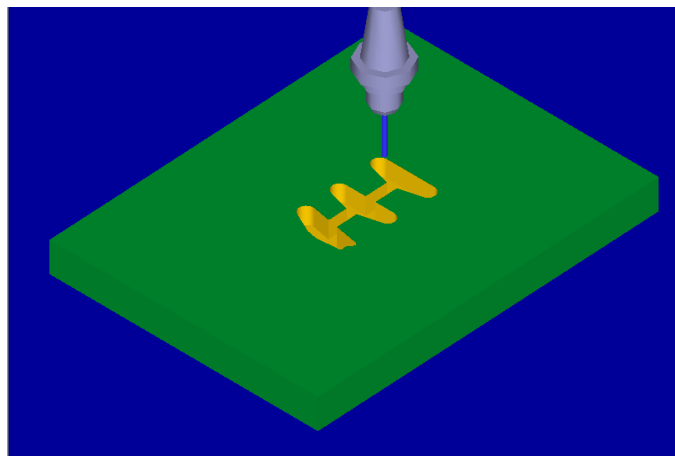


Figura 26 – Simulação da abertura da cavidade dos captadores

5.3.4 Operação 4: Abertura dos furos do braço

Para essa operação será utilizada a fresa de topo reto de 1/8" (Fresa nº3).

O diâmetro de cada um dos quatro furos, onde o braço da guitarra será aparafusado posteriormente, valem 1/6" e possuem 1,75 pol e profundidade.

A opção de se fazer esses furos através de um processo de fresamento (ao invés de uma furação), foi meramente econômica, pois assim é preciso menos uma ferramenta para a fabricação. (Caso optasse-se por uma broca de 1/6" de diâmetro, haveria a necessidade de incorporar mais uma ferramenta no processo, para os furos da ponte, que possuem 1/8" de diâmetro)

Na Figura 27, pode-se observar os furos do braço no modelo 3D. Já a Figura 28 ilustra a simulação do pocketing desses furos.

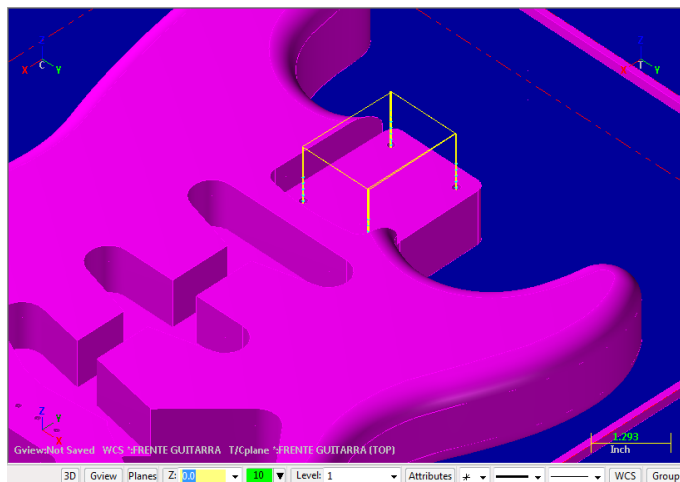


Figura 27 - Furos do braço no modelo 3D

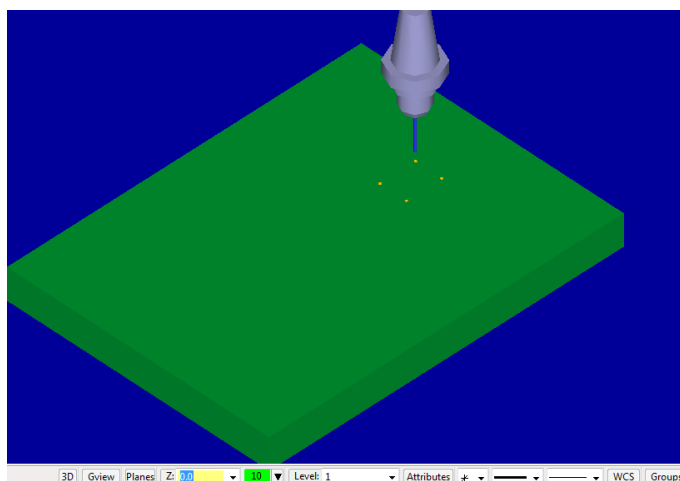


Figura 28 - Simulação do Pocketing dos furos do braço

5.3.5 Operação 5: Furacão da estrutura de fixação da ponte.

Essa operação consistirá em 6 furações, onde posteriormente será aparafusada a ponte da guitarra, com a fresa de topo reto de 1/8" (fresa nº3). Cada um desses furos possui 1/8" de diâmetro e 0,787 pol de profundidade.

A opção de se utilizar uma fresa para o processo de furação, ao invés de uma broca, novamente foi meramente econômica. Pois desse modo há a necessidade de menos ferramentas envolvidas no processo. Neste processo, a penetração da ferramenta na madeira será vertical (mergulho). Uma maneira de amenizar os efeitos causados por esse tipo de penetração, como desgaste, avarias e aquecimento da

ferramenta, é limitar a profundidade de corte por passos. Isto é, ao invés de realizar o corte em um único passo, ele será dividido em multipassos. Outra vantagem de realizar essa furação em multipassos, é a retirada do cavaco (serragem) feita pela própria ferramenta, uma vez que a ferramenta sai do bloco de madeira, a cada passo.

Os parâmetros utilizados para essa operação de furação foram:

- **Recuo (*Retract*):** 0.1 pol
- **ap por passo (*Peck*):** 0.2 pol

Deve-se ressaltar que broca possui aresta de corte secundária, permitindo a furação sem maiores problemas.

Na Figura 29, os furos da ponte podem ser observados. A simulação da furação dos mesmos pode ser vista na Figura 30.

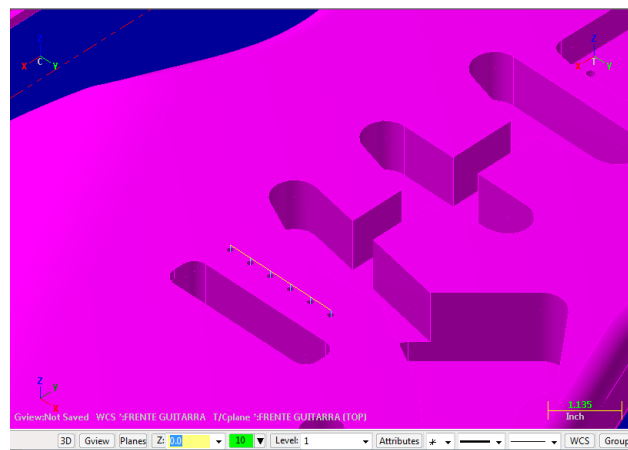


Figura 29 - Furos da ponte no modelo 3D

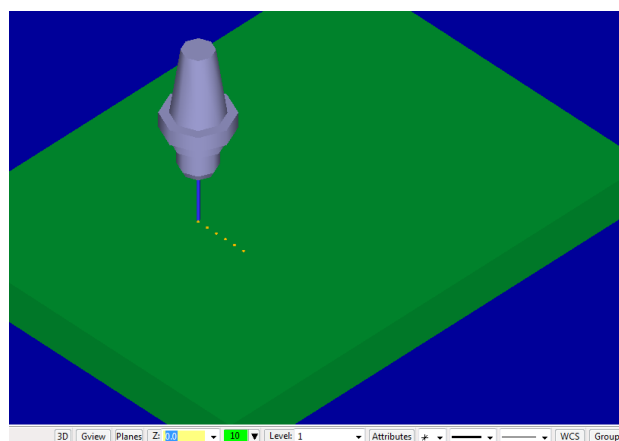


Figura 30 - Simulação da furacão da estrutura de fixação da ponte

5.3.6 Operação 6: Abertura da cavidade do braço da guitarra

Nesta operação será realizado o fresamento da cavidade onde o braço da guitarra será encaixado e depois aparafusado. A fresa que fará essa operação será a fresa nº1. A penetração da ferramenta será em movimento de rampa com ângulo de Zigue-Zague de 10°. O passo é de 70% (0,175"). As Figuras 31 e 32 mostram respectivamente a cavidade do braço e a simulação da sua abertura.

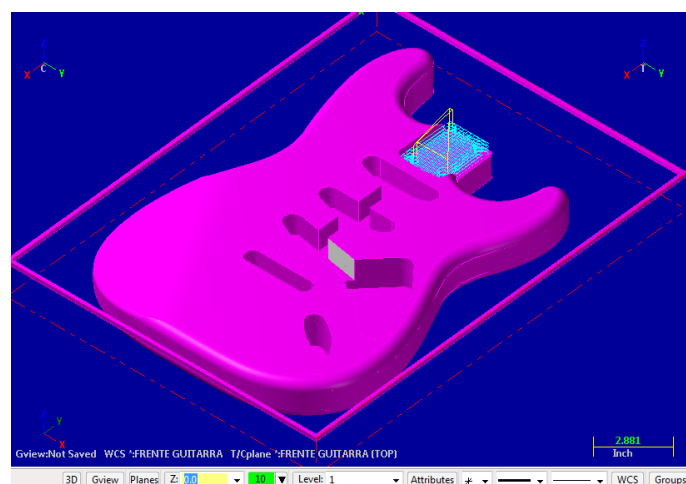


Figura 31 - Cavidade do braço no modelo 3D

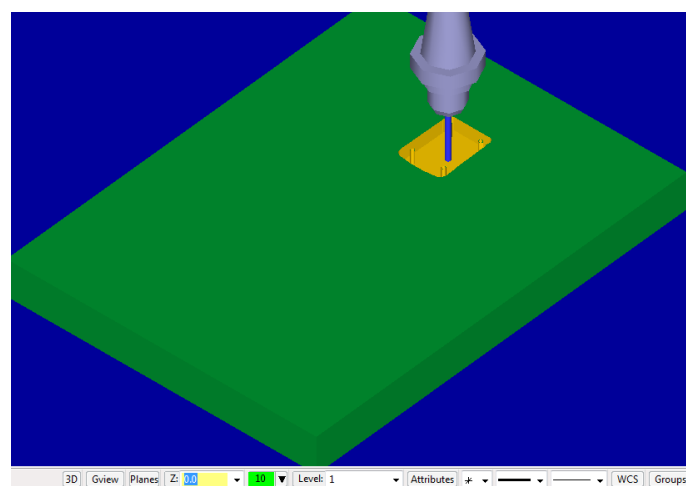


Figura 32 - Simulação da abertura da cavidade do braço

5.3.7 Operações 7 e 8: Desbaste e acabamento da Zona de conforto 1

Estas operações consistirão no fresamento da superfície de conforto 1. Essa superfície possui um formato ergonômico apropriado, de forma que o braço do usuário fique melhor acomodado ao tocar a guitarra.

A fresa que fará essas operações será a fresa nº2. A escolha de uma fresa de topo esférico, ao invés de uma reta, para os fresamentos de superfície, dá-se devido ao melhor acabamento superficial (menor rugosidade) final proporcionado pelas fresas de topo esféricas.

As **operações 7** (Desbaste da Zona de conforto 1) e **8** (Acabamento da Zona de conforto 1) são realizadas com a mesma fresa, na mesma região do bloco de madeira. A diferença básica entre elas é o valor do passo radial (*stepover*). As operações de desbaste possuem um passo radial maior do que as operações de acabamento, produzindo assim um acabamento final pior (maior rugosidade). As figuras 19 e 20 ilustram bem a diferença entre a rugosidade final das duas operações, variando apenas passo.

O Mastercam permite um controle do passo radial (*stepover*) através diretamente da altura das cristas (*Scallop Heights*). Isto é, define-se a rugosidade final desejada, e o MasterCam calculará o valor do passo radial necessário (que varia com o diâmetro da fresa) para que tal rugosidade seja alcançada.

Os valores de rugosidade utilizados são mostrados abaixo:

- **Desbaste:** Altura das cristas = 0.05 pol
- **Acabamento:** Altura das cristas = 0.002 pol

Nota 1: Seria possível usinar todas as superfícies deste projeto usando apenas os parâmetros acabamento. Entretanto, isso não seria a melhor solução. É interessante remover material antes de fazer uma operação com um passo muito pequeno, caso contrário, a máquina ficaria sob uma tensão grande por muito tempo, pois ela teria que remover uma grande quantidade de material com um passo muito pequeno. Ao realizar uma pré-remoção de material através de uma operação com um passo maior, diminui-se essa tensão, e também aumenta-se a vida da ferramenta.

Nota 2: Todas as operações subsequentes de superfície (*surface*) nesse projeto serão feitas seguindo as configurações adotadas acima.

Nota 3: A escolha do valor do passo tão pequeno para operação de acabamento foi feita de modo a minimizar ou até mesmo eliminar o lixamento manual que deve ser feito após a retirada do corpo da guitarra da fresadora. Desse modo, o processo de fabricação do corpo fica inteiramente automatizado, e não há a necessidade de contratar um funcionário para realizar o lixamento manual do corpo da guitarra, o que tornará o processo mais econômico.

A zona de conforto 1 pode ser observada na Figura 33 e a simulação da sua criação, na Figura 34.

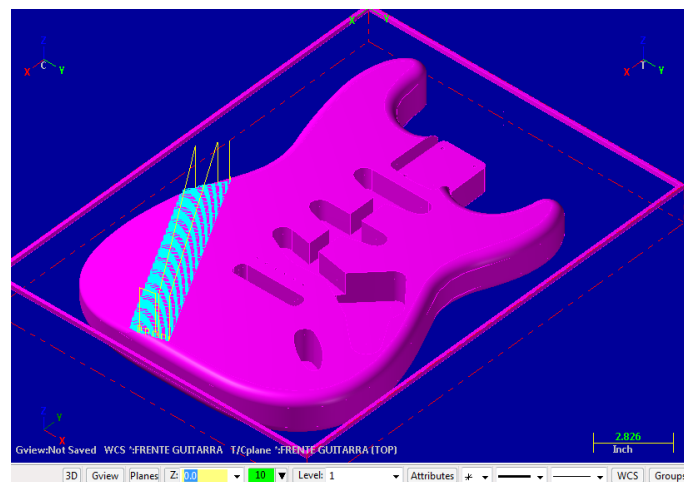


Figura 33 - Zona de conforto 1 no modelo 3D

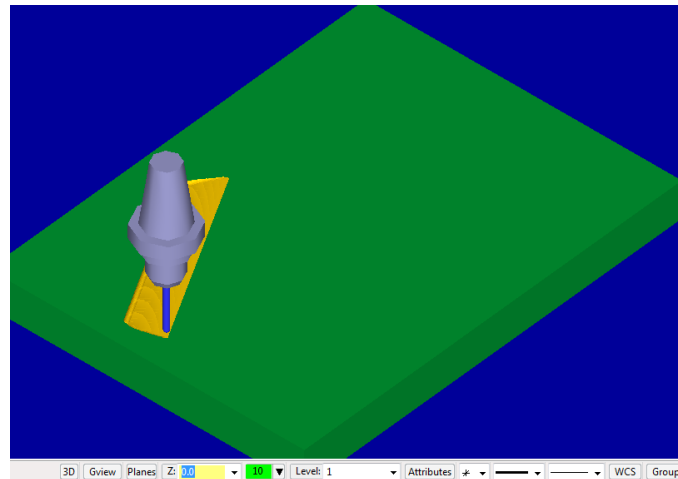


Figura 34 - Simulação da criação de superfície da zona de conforto 1

5.3.8 Operações 9 e 10: Desbaste e acabamento da Zona de conforto 2

Fresamento da superfície de conforto 2. A fresa que fará essas operações será a fresa nº2. A zona de conforto 2 pode ser vista na Figura 35 e a simulação da sua criação, na Figura 36.

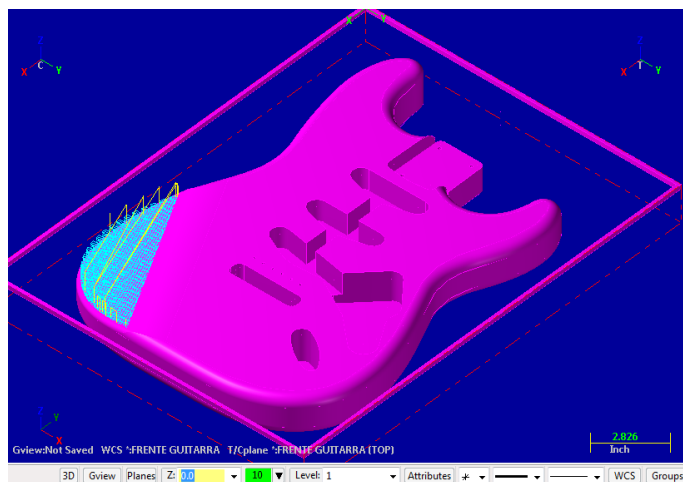


Figura 35 - Zona de conforto 2 no modelo 3D

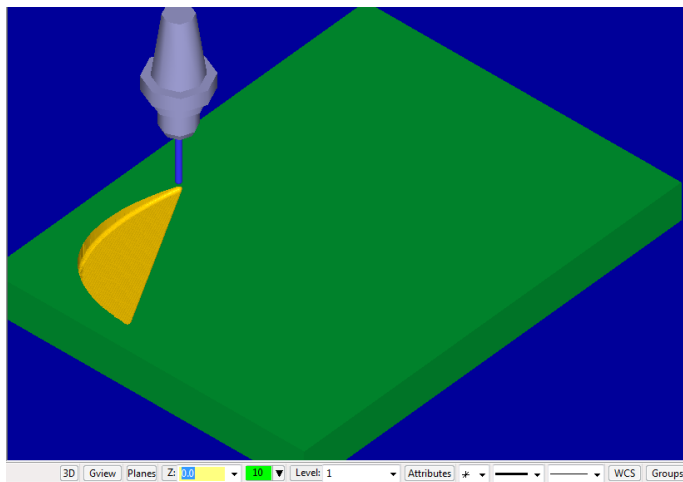


Figura 36 - Simulação criação de superfície da zona de conforto 2

5.3.9 Operações 11 a 16: Desbaste e acabamento das laterais superiores 1,2,3

Fresamento das laterais superiores da guitarra. A direção do corte é feita de forma a acompanhar o perímetro da guitarra, dessa forma as fibras da madeira ficam com melhor acabamento final. A fresa que fará essas operações será a fresa nº2.

Essas laterais podem ser vistas na Figura 37, abaixo. A Figura 38 mostra a simulação da criação da superfície dessas laterais.

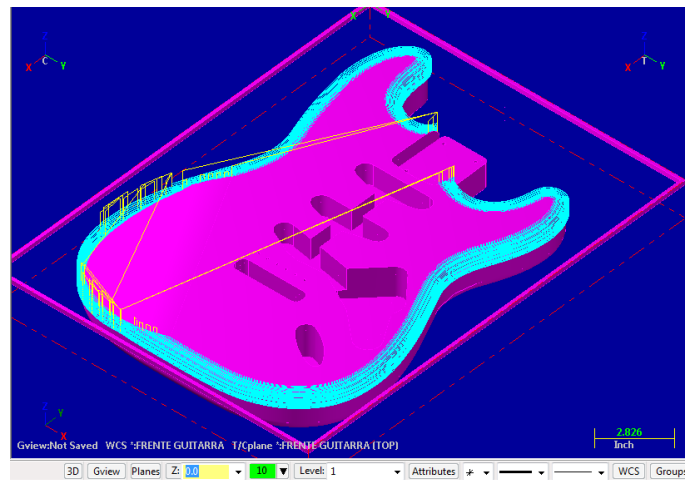


Figura 37 - Laterais superiores 1,2 e 3 no modelo 3D

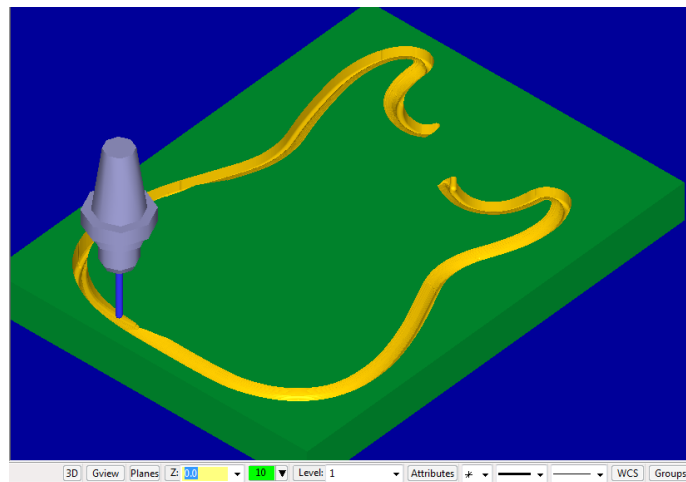


Figura 38 - Simulação criação de superfície das laterais superiores 1,2 e 3

5.3.10 Operações 1 a 16: Parte de frente da guitarra

Resumo das 16 operações necessárias para a fabricação da parte superior da guitarra. A Figura 39 ilustra a parte de cima da guitarra e a Figura 40 mostra o resultado da simulação das operações 1 a 16.

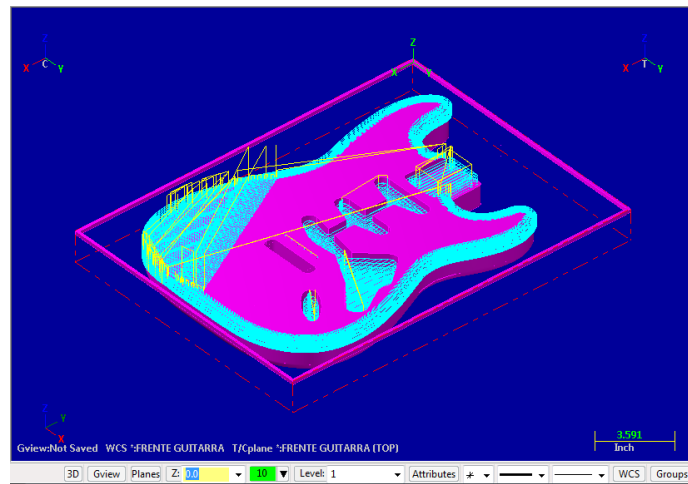


Figura 39 - Parte de cima da guitarra no modelo 3D

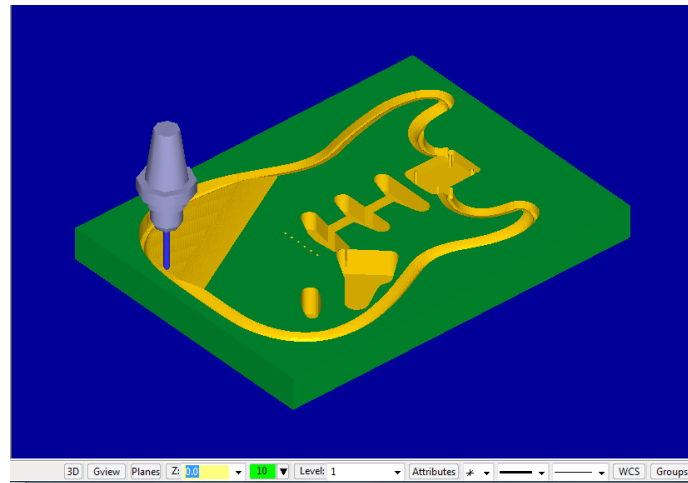


Figura 40 - Simulação das operações 1 a 16

5.3.11 Operação 17: Abertura da cavidade da ponte

A primeira das operações da parte de trás da guitarra consistirá no fresamento da cavidade da ponte. É **extremamente importante** ressaltar que nesse ponto deverá se fazer uma pausa do programa, e virar o bloco de usinagem. Caso isso não seja feito, a operação 17 e as subsequentes serão realizadas na parte de cima da guitarra, arruinando todo o processo.

A fresa que fará essa operação será a fresa nº1. A penetração da ferramenta será em movimento de rampa com ângulo de Zigue-Zague de 10°. O passo é de 70% (0,175").

A cavidade da ponte pode ser vista na Figura 41. Na Figura 42, tem-se a simulação do pocketing da sua cavidade.

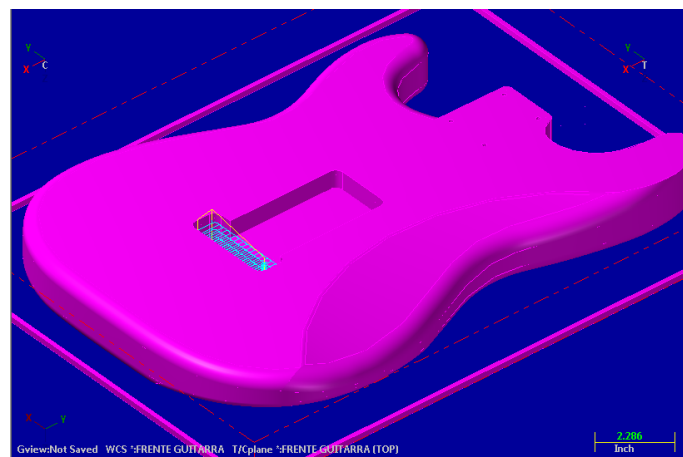


Figura 41 - Cavidade da ponte no modelo 3D

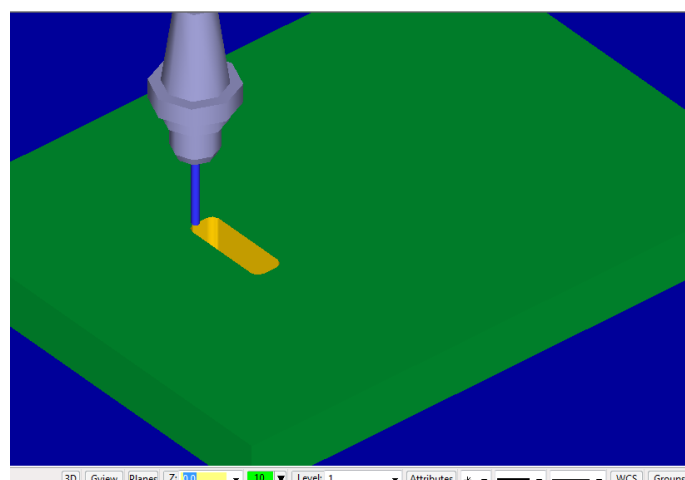


Figura 42 - Simulação do Pocketing da cavidade da ponte

5.3.12 Operação 18: Abertura da cavidade do sistema de alavanca

Nesta operação será realizado o fresamento da cavidade onde o sistema de molas da alavanca será instalado. Essa cavidade está ilustrada na Figura 43 e a simulação do seu Pocketing, na Figura 44. A fresa que fará essa operação será a fresa nº1. A penetração da ferramenta será em movimento de rampa com ângulo de Zigue-Zague de 10°. O passo é de 70% (0,175").

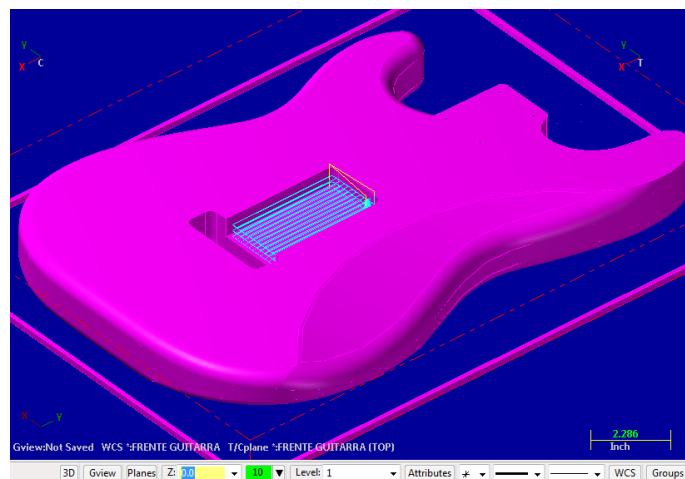


Figura 43 - Cavidade do sistema de alavanca no modelo 3D

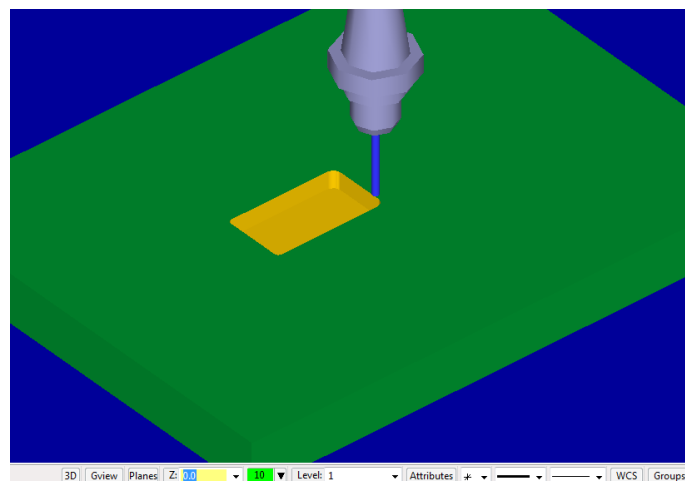


Figura 44 - Simulação do Pocketing da cavidade do sistema de alavanca

5.3.13 Operações 19 a 22: Desbaste e acabamento das Zonas de conforto 3 e 4

Fresamento da superfície de conforto 3 e 4. A fresa que fará essas operações será a fresa nº2. Essas zonas estão ilustradas na Figura 45 e a simulação da criação dessas superfícies, na Figura 46.

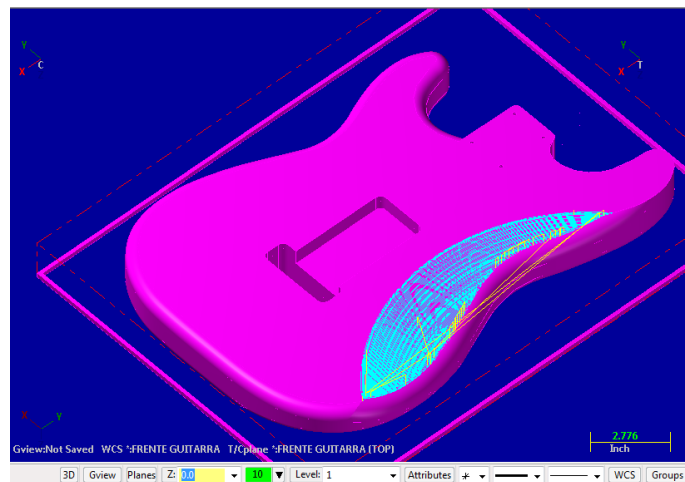


Figura 45 - Zonas de conforto 3 e 4 no modelo 3D

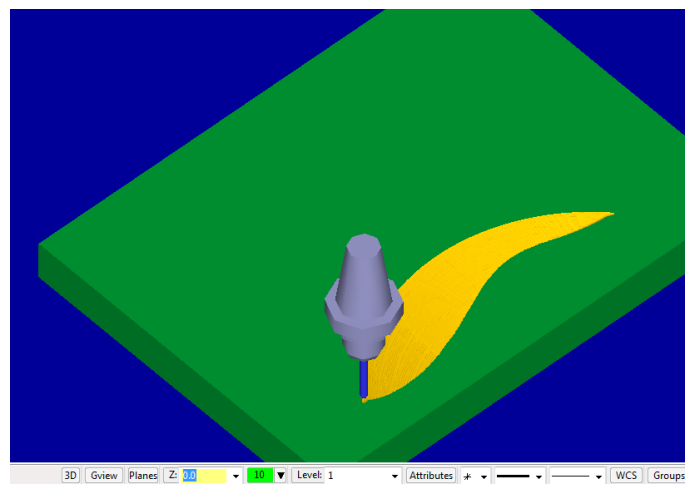


Figura 46 - Simulação criação de superfície das zonas de conforto 3 e 4

5.3.14 Operações 23 a26: Desbaste e acabamento das laterais inferiores 1 e 2

Fresamento das laterais superiores da guitarra, como mostrado na Figura 47. A fresa que fará essas operações será a fresa nº2. Na figura 48, a simulação da criação da superfície dessas laterais.

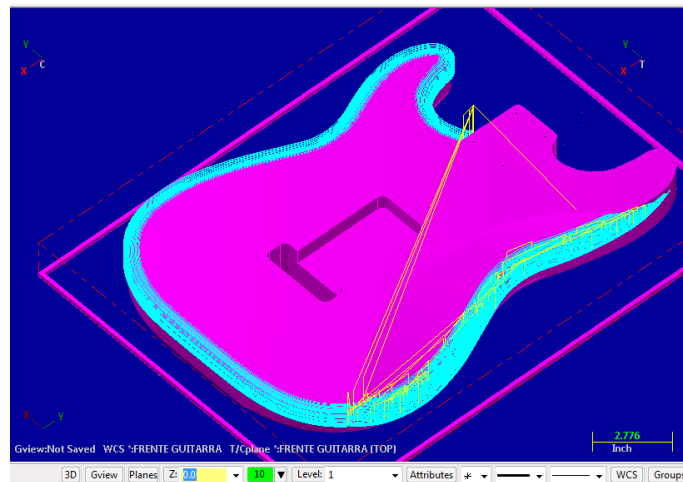


Figura 47 - Laterais inferiores 1 e 2 no modelo 3D

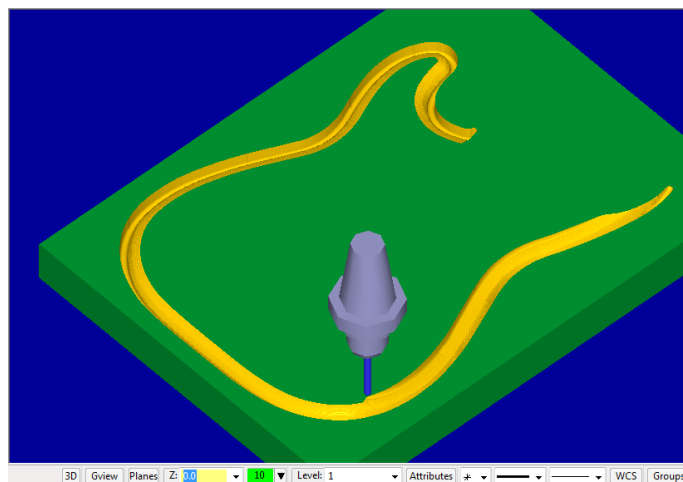


Figura 48 - Simulação criação de superfície das laterais inferiores 1 e 2

5.3.15 Operações 27: Contorno do perímetro da guitarra

A ultima das operações consistirá no corte da guitarra. Esse corte será realizado através do contorno da guitarra, usinado pela fresa nº1. Seu perímetro pode ser visto na Figura 49. Já, na Figura 50, pode-se ver a simulação do contorno do seu perímetro.

De modo a não colocar nem a ferramenta, nem a máquina sob grande estresse, esse corte será realizado em passos. Assim, preserva-se maquina e ferramenta, e torna o processo mais seguro.

A profundidade de corte de cada passo é de 0,25 pol.

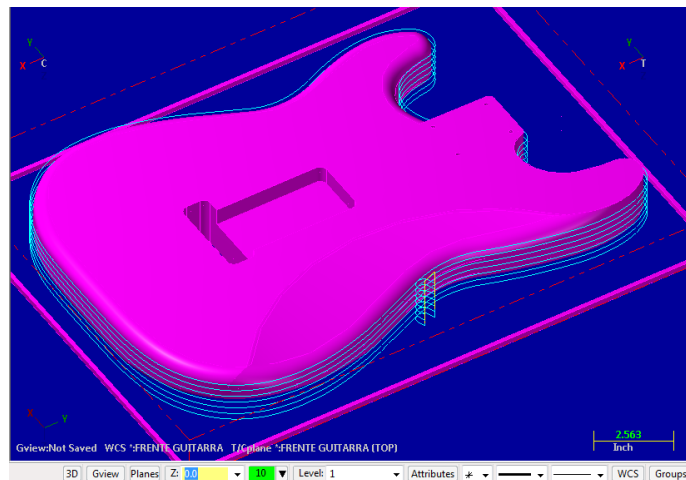


Figura 49 - Perímetro da guitarra no modelo 3D

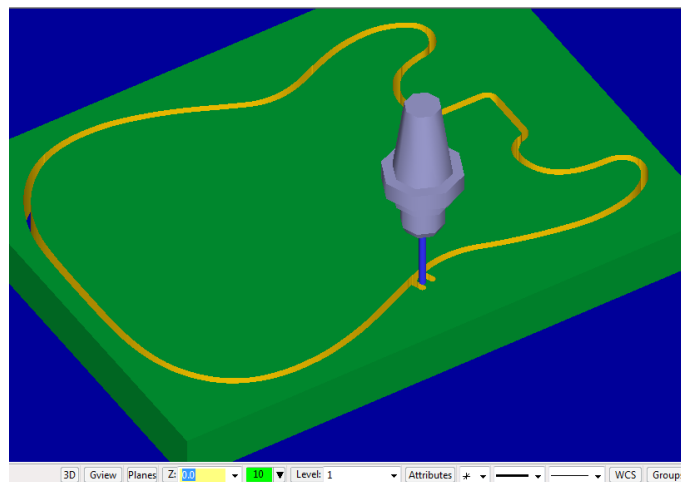


Figura 50 - Simulação do Contorno do perímetro da guitarra

5.3.16 Operações 17 a 27: Parte de trás da guitarra

A Figura 51 mostra as superfícies a serem usinadas da parte de trás da guitarra. O resumo das simulações das operações 17 a 27 pode ser visto na Figura 52.

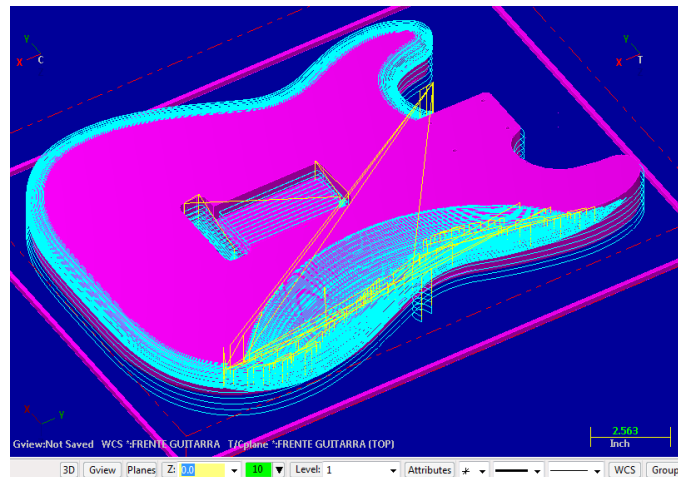


Figura 51 - Parte de trás da guitarra no modelo 3D

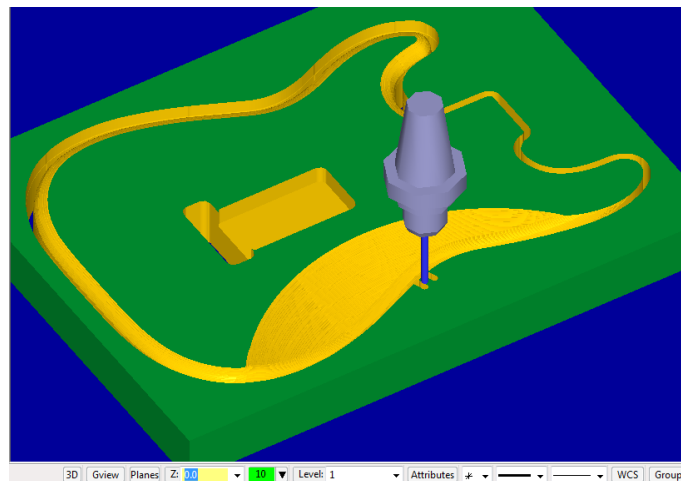


Figura 52 - Simulação das operações 17 a 27

5.3.1 Operações 1 a 27: Guitarra Finalizada

A Figura 53 mostra todas as superfícies a serem usinadas no corpo da guitarra. O resumo de todas as simulações das operações pode ser visto na Figura 54.

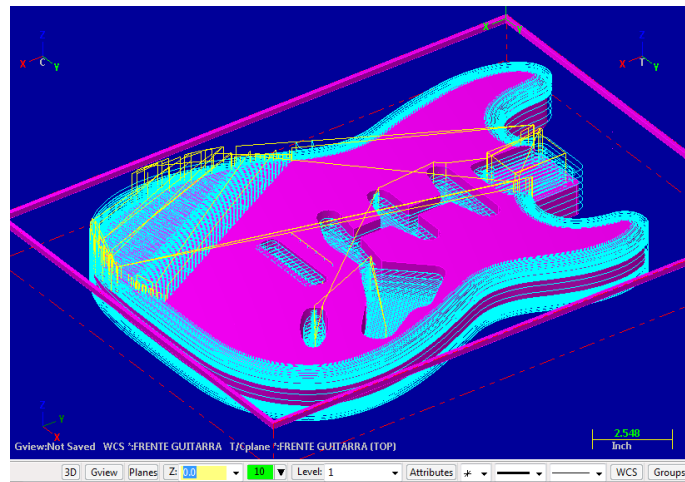


Figura 53 - Corpo da guitarra no modelo 3D

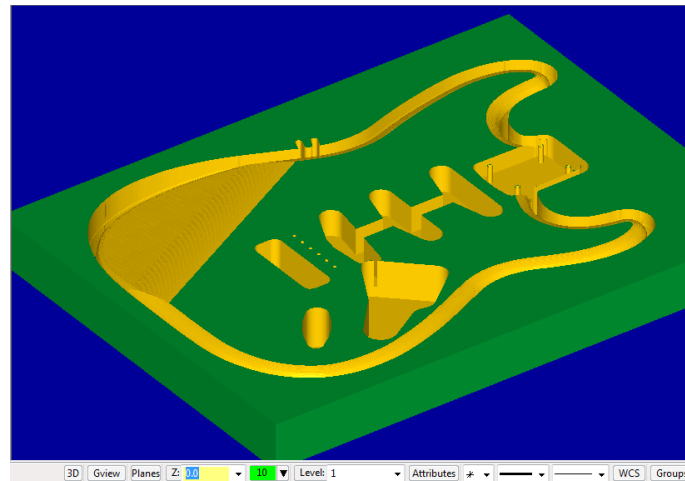


Figura 54 - Simulação de todas as operações

5.4 Detalhes do processo de usinagem

Alguns resultados finais são interessantes de se destacar. O primeiro deles é o tempo de operação. Este consiste no tempo total, desde que o programa é iniciado até o seu término, e engloba tanto tempos usinando, quanto tempos gastos em movimentos rápidos.

- Tempo usinando: 46m:7.62s
- Tempo gasto em movimentos rápidos: 59.08s
- Tempo Total: 47m:6.70s

Outro resultado de importância é a distância percorrida pelas ferramentas no processo.

- Distancia total usinando: 9090.035 pol (231,08 m)
- Distancia total em movimentos rápidos: 823.483 pol (20,92 m)

A tabela 6 resume as operações de cada fresa, indicando, para cada uma, a distância usinada, o tempo usinando, a velocidade de avanço e o número de operações realizadas.

Tabela 6 - Resumo das operações de cada fresa

Nº da fresa	Tipo de fresa	Diâmetro de Corte	Distância usinando (pol)	Tempo usinando	Velocidade de avanço (pol/min)	Nº de Operações
1	Reta	1/4"	1811.387	7m:54.23s	229.18	7
2	Esférica	1/4"	7246.816	37m:53.73	190.98	18
3	Reta	1/8"	31.832	16.67s	458.4	2

A Figura 55 foi exportada do programa Software, e apresenta informações gerais sobre o processo de usinagem deste projeto, tais como tempos, distâncias, percursos e velocidades de avanço.

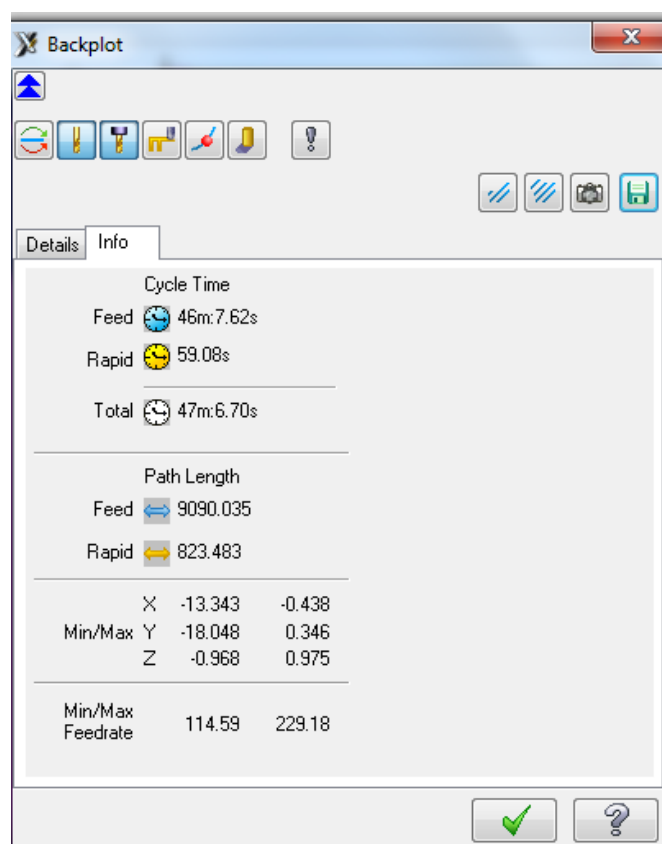


Figura 55 - Tempos, percursos e velocidades do processo

Um resumo das 27 operações pode ser encontrado na tabela 7. Nesta tabela são descritos, para cada uma das 27 operações, a fresa utilizada, a distância usinada, o tempo usinando, o tempo total, e a velocidade de avanço , RPM e velocidade de corte utilizados.

Tabela 7 - Resultados das operações

Nº da operação	Nº da fresa utilizada	Distância usinada (pol)	Tempo usinando	Tempo Total	Velocidade de avanço (pol/min)	RPM	Velocidade de corte (pé/min)
1	1	357.311	1m:33.54s	1m:36.17s	229.18	3820	250
2	1	103.026	26.97s	28.09s	229.18	3820	250
3	1	355.947	1m:33.19s	1m:34.05s	229.18	3820	250
4	3	26.508	13.88s	15.32s	458.4	7640	250
5	3	5.324	2.79s	3.05s	458.4	7640	250
6	1	197.619	51.74s	55.19s	229.18	3820	250
7	2	166.078	52.18s	55.07s	190.98	3820	250
8	2	311.327	1m:37.81s	1m:37.88s	190.98	3820	250
9	2	269.580	1m:24.69s	1m:27.95s	190.98	3820	250
10	2	296.444	1m:33.13s	1m:31.22s	190.98	3820	250
11	2	450.601	2m:21.56s	2m:24.54s	190.98	3820	250
12	2	384.738	2m:00.87s	2m:00.93s	190.98	3820	250
13	2	276.897	1m:26.99s	1m:30.68s	190.98	3820	250
14	2	141.694	44.52s	44.56s	190.98	3820	250
15	2	728.991	3m:49.03s	3m:53.96s	190.98	3820	250
16	2	628.112	3m:17.33s	3m:17.38s	190.98	3820	250
17	1	179.479	46.99s	49.05s	229.18	3820	250
18	1	183.039	47.92s	48.58s	229.18	3820	250
19	2	305.308	1m:35.92s	1m:39.16s	190.98	3820	250
20	2	496.574	2m:36.01s	2m:36.46s	190.98	3820	250
21	2	137.660	4.32s	4.32s	190.98	3820	250
22	2	83.694	26.29s	26.29s	190.98	3820	250
23	2	846.372	4m:25.90s	4m:30.27s	190.98	3820	250
24	2	705.385	3m:41.61s	3m:48.03s	190.98	3820	250
25	2	740.273	3m:52.57s	3m:52.57s	190.98	3820	250
26	2	400.982	2m:5.98s	2m:5.98s	190.98	3820	250
27	1	434.967	1m:53.58s	1m:54.22s	229.18	3820	250

O processo de fabricação da guitarra foi descrito neste capítulo. É interessante destacar que os parâmetros definidos, as operações e os movimentos, seriam basicamente os mesmos para o processo de fabricação de guitarra com outros formatos. Portanto, há uma facilidade em se usinar diferentes tipos de corpos de guitarra, usando os mesmos procedimentos e métodos empregados neste capítulo. Isto é algo positivo, pois demonstra a versatilidade deste projeto.

6 Análise de Custos

A análise de custos do processo será feita para avaliar a viabilidade, em termos econômicos, do processo de fabricação de corpos de guitarra elaborado neste projeto.

Serão feitas estimativas e hipóteses embasadas, para chegar-se a valores próximos do custo que o processo real acarretaria.

6.1 Ciclos e tempos de usinagem

O ciclo de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças, é constituído diretamente pelas seguintes fases:

1. Colocação e fixação da peça;
2. Aproximação e posicionamento da ferramenta;
3. Corte;
4. Afastamento da ferramenta;
5. Inspeção e retirada da peça;
6. Preparo da Máquina;
7. Remoção da ferramenta para sua substituição;
8. Recolocação e ajustagem da nova ferramenta

Cada uma dessas fases pode ser atrelada a um tipo de tempo diferente, como segue:

- t_t = tempo total de usinagem
- t_c = tempo de corte (fase 3)
- t_s = tempo secundário (fases 1 e 5)
- t_a = tempo de aproximação e afastamento (fases 2 e 4)
- t_p = tempo de preparo da máquina (fase 6)
- t_{ft} = tempo de troca da ferramenta (fases 7 e 8)

Logo, o tempo total de usinagem será a soma de cada um desses tempos, e pode ser relacionado pela equação 9.1:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{N_t}{Z} \cdot t_{ft} \quad (6.1)$$

onde:

$Z = \text{N}^\circ \text{ de peças produzidas}$

$N_t = \text{N}^\circ \text{ de trocas da ferramenta}$

Para a fabricação de um corpo de guitarra temos:

$Z = 1$

$N_t = 0$

$t_{ft} = 0$ (Troca automática)

Logo, a equação 9.1 torna-se:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + t_p \quad (6.2)$$

6.2 Estimativas dos tempos de usinagem

O **tempo de corte** (t_c) em operações em que o avanço da ferramenta não segue uma trajetória retilínea, não pode ser calculado através de uma equação direta. Nesses casos, a maneira mais simples de determiná-lo é cronometrando o tempo de corte. Baseado nas simulações feitas em Mastercam, o tempo de corte do processo é dado por:

$$t_c = 48 \text{ min}$$

O **tempo secundário** (t_s) consiste na colocação e fixação e retirada da peça da mesa.

Para a colocação e fixação da peça (que será feita duas vezes devido ao fato da guitarra ter de ser virada no meio da operação) estima-se 4 minutos para cada fixação. Totalizando, portanto, 8 minutos nessa etapa. Para a retirada da peça da mesa foi estimado o tempo de 2 minutos.

Dessa forma, o tempo total secundário será:

$$t_s = 10 \text{ min}$$

O **tempo de aproximação e afastamento** da ferramenta (t_a) é estimado em:

$$t_a = 5 \text{ min}$$

O **tempo de preparo da máquina** (t_p) é o tempo que se leva para preparar a máquina, posicionar a origem, definir parâmetros etc. Estima-se esse tempo em:

$$t_a = 25 \text{ min}$$

Portanto, o **tempo total de usinagem** (t_t) será a soma de todos os tempos parciais:

$$t_t = 88 \text{ min}$$

6.3 Custos de produção

Diversos são os custos envolvidos na produção de uma peça. Pode-se dividi-los em duas categorias: os decorrentes do processo propriamente dito, como custos das ferramentas e de ocupação das máquinas e dos operadores. E aqueles não diretamente envolvidos com o processo, como custo de controle de qualidade, da matéria-prima, da mão-de-obra indireta, etc. Para a análise dos custos com o fim de se obter a velocidade econômica de corte (velocidade de mínimo custo), só é necessário considerar a primeira categoria. Assim, os custos diretamente envolvidos com a produção de uma peça por usinagem são: (Diniz, Marcondes, Coppini, [2])

- K_p = de produção por peça
- K_{us} = da mão-de-obra de usinagem
- K_{uf} = das ferramentas (depreciação, troca, afiação, etc)
- K_{um} = da máquina (depreciação, manutenção, espaço ocupado, energia consumida etc.)

onde:

$$K_p = K_{us} + K_{uf} + K_{um} \quad (6.3)$$

Essas parcelas podem ser dadas por:

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{S_h}{60} \left(\frac{R\$}{\text{peça}} \right) \quad (6.4)$$

onde:

t_t = tempo total de confecção da peça em minutos

S_h = salário e encargos do operador em R\$/hora

$$K_{um} = \frac{t_t}{H \cdot 60} \left[\left(V_{mi} \cdot V_{mi} \cdot \frac{m}{M} \right) \cdot j + \frac{V_{mi}}{M} + K_{mc} + E_m \cdot K_e \cdot j \right] \left(\frac{R\$}{pe\tilde{c}a} \right) \quad (6.5)$$

onde:

V_{mi} = Valor inicial de aquisição (R\$)

m = Idade da máquina (em anos)

M = Vida prevista para a máquina (em anos)

j = taxa de juros (ano)

K_{mc} = custo anual de manutenção da máquina (R\$/ano)

E_m = espaço ocupado pela máquina (m²)

K_e = custo do m² ocupado pela máquina (R\$/m².ano)

H = número de horas de trabalho por ano

$$S_m = \left[\left(V_{mi} \cdot V_{mi} \cdot \frac{m}{M} \right) \cdot j + \frac{V_{mi}}{M} + K_{mc} + E_m \cdot K_e \cdot j \right] = \text{custo total da máquina}$$

Assim:

$$K_{um} = \frac{t_t}{60} \cdot S_m \quad (6.6)$$

E por fim,

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \quad (6.7)$$

onde:

K_{ft} = Custo da ferramenta por vida

Z_t = Número de peças usinadas por vida T da ferramenta

Além dos custos descritos pela equação 9.3, existe também o custo da matéria prima, que será definido como K_{mp} , logo a equação 9.3 torna-se:

$$K_p = K_{us} + K_{uf} + K_{um} + K_{mp} \quad (6.8)$$

6.4 Estimativa dos custos de produção

O **custo da mão-de-obra** (K_{us}) foi estimado considerando um salário de R\$ 2400,00 mensais para o operador CNC, com jornada de trabalho diária de 8 horas e trabalhando 20 dias por mês. Isto dá um custo de R\$ 15,00/ hora.

Assim tem-se:

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{S_h}{60} = t_t \cdot \frac{15}{60} = 0,25t_t = 22 \text{ R\$/peça}$$

O **custo da máquina** (K_{um}) é dividido em várias partes.

- Valor Inicial de aquisição:
 - Modelo da Máquina: NC-R1325 Router (Nice-Cut)
 - Preço de catálogo: U\$D 3.299,00.
 - Frete: U\$D: 700,00
 - Taxa de importação alfandegária: 60%
 - Preço total em R\$: 12.700

Nota: Cotação do Dólar = 1,98 Reais em 31/01/2012

- Idade da Máquina: 0 anos
- Vida prevista para a máquina: 5 anos

O valor da vida prevista para a máquina foi estimado em 5 vezes a garantia oferecida pelo fabricante, que vale 1 ano.

- Taxa de juros: 7,14% a.a. em 28/11/2012– Fonte Banco do Brasil
- Custo anual de manutenção: R\$1535,00

Para operações com madeira maciça, recomenda-se parar a máquina a cada quatro dias de trabalho para a limpeza da mesma. [13]

Considerando-se 240 dias de trabalho ao ano, a máquina deverá ser parada 60 dias. Estima-se o tempo de limpeza da máquina em 1 hora. Portanto o custo de mão-de-obra de manutenção será de R\$900,00/ano

O custo de manutenção de peças foi estimado em 5% do valor de aquisição da máquina, isto é, R\$ 635,00/ano.

Logo, o custo total de manutenção será de R\$1535,00/ano

- Espaço ocupado pela máquina: 6,08 m²
- Custo do metro² ocupado pela máquina: 2.786R\$/m².ano

Preço do m² em Duque de Caxias, Rio de Janeiro (*Tabela FIPE – Janeiro de 2013*)

- Horas de trabalho ao ano: 1440

Considerando-se 240 dias úteis no ano, e uma jornada de trabalho e 8 horas diárias. Estimou-se 6 horas de operação diárias.

$$S_m = \left[\left(V_{mi} \cdot V_{mi} \cdot \frac{m}{M} \right) \cdot j + \frac{V_{mi}}{M} + K_{mc} + E_m \cdot K_e \cdot j \right] = 22223,31 \text{ R\$/ano}$$

Dividindo o valor acima pelas horas de trabalho ao ano tem-se:

$$S_m = 15,43 \text{ R\$/Hora}$$

Da equação 6.6, calcula-se o custo da máquina por peça.

$$K_{um} = \frac{t_t}{60} \cdot S_m = 22,63 \text{ R\$/peça}$$

Custo da ferramenta (K_{uf})

O desgaste de uma ferramenta está diretamente atrelado às condições de usinagem, material da ferramenta e sua geometria e o material de trabalho.

Das condições de usinagem os fatores que mais contribuem para a progressão do desgaste, em ordem decrescente, são a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem.

A velocidade de corte é o parâmetro que mais contribui para o desgaste, visto que quanto mais alta, mais energia (calor) é gerada no processo.

O modo de avaliar a vida de uma ferramenta (percurso de corte) é muito mais empírico do que teórico, sendo encontrado na maioria das vezes através de ensaios e testes.

Estima-se para esse processo um caso muito improvável, isto é, cada ferramenta durará apenas uma fabricação nessa estimativa. Esta estimativa está longe da encontrada em experiências de fabricantes, onde as ferramentas duram muito mais do

que apenas uma peça. Entretanto, como esse estudo de viabilidade é baseado numa fábrica que estaria ingressando nesse ramo, é razoável estimar um caso ruim, pois não há *know-how* sobre o processo, e é melhor superestimar os custos do que subestima-los.

A tabela 8 fornece os preços de cada uma das fresas, segundo o fabricante American Carbide [12].

Tabela 8 –Preços das fresas utilizadas

Nº da fresa	Tipo de fresa	Diâmetro de Corte	Preço em U\$	Preço em R\$
1	Reta	1/4"	11,02	21,82
2	Esférica	1/4"	15,04	29,78
3	Reta	1/8"	6,54	12,95

Nota: Cotação do Dólar = 1,98 Reais em 31/01/2012

Logo, o custo para as ferramentas será:

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} = \frac{21,82 + 29,78 + 12,95}{1} = 64,55 \text{ R$/Peça}$$

O **custo da matéria prima** (K_{mp}) pode ser estimado a seguir. O preço do metro cúbico do mogno amazônico custa em torno de R\$ 5000,00 [2] O volume do bloco de mogno que será usado na fabricação do corpo da guitarra possui 0,00924 m³ (575 pol³). Logo, o custo de matéria prima por peça é dado por:

$$K_{mp} = 5000.0,00924$$

$$K_{mp} = 46,2 \text{ R$/peça}$$

Portanto, o **custo total**(K_p) será a soma de todos os custos do processo:

$$K_p = K_{us} + K_{uf} + K_{um} + K_{mp} = 155,38 \text{ R$/peça}$$

6.5 Viabilidade econômica do projeto

No Brasil, o preço de um corpo de guitarra de madeira nobre (como é o caso do Mogno amazônico) está na faixa de R\$ 250,00 a R\$ 600,00. Portanto, a primeira impressão, o processo parece bastante viável e promissor.

7 Conclusão

O Trabalho desenvolvido teve como objetivo o projeto de fabricação de um corpo de guitarra em comando numérico. O resultado encontrando foi satisfatório, tanto em termos de viabilidade de engenharia, quanto em termos de viabilidade econômica.

Do ponto de vista da fabricação, foi possível apresentar uma maneira simples e bastante pragmática de se usar madeira, abordando cada um dos pontos críticos do processo e descrevendo detalhadamente os métodos para obter o perfil desejado.

Além disso, é interessante ressaltar a facilidade em ingressar nesse tipo de negócio. Pois com uma máquina de custo inicial relativamente baixo é possível fabricar corpos de guitarra com preço de mercado competitivo.

A oportunidade de desenvolver esse projeto foi importante para a minha formação uma vez que eu coloquei em prática alguns dos conhecimentos obtidos durante o meu curso de graduação. Além disso, esbarrar nas dificuldades desse projeto, e procurar e desenvolver soluções para contorná-las foi um grande desafio para mim, pois não existe muita literatura acerca desse assunto, e grande parte das soluções foram desenvolvidas por mim. Acredito que no futuro, esse projeto possa servir de base para outras pessoas que desejam aprender um pouco mais sobre como projetar uma guitarra em comando numérico, e que esbarram na falta de informação sobre esse tema.

8 Referências Bibliográficas

- [1] Guitarra Elétrica, disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Guitarra_el%C3%A9trica>, Acessado em 28 de dezembro de 2012.
- [2] DINIZ, ANSELMO E., MARCONDES, FRANCISCO C., COPPINI, NIVALDO L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6 ed. São Paulo, Artliber; 2008.
- [3] SOUZA JR, NELSON D., *Qualidade de superfície na produção de peças S2S no setor de usinagem de uma indústria de molduras de Pinus*, Projeto de Graduação, Universidade Federal do Paraná, Paraná, Brasil, 2009.
- [4] STOETERAU, RODRIGO L., “Processos de usinagem”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [5] Department of Engineering, University of Cambridge, disponível em: <<http://www.eng.cam.ac.uk>>, Acessado em 11 de janeiro de 2013
- [6] Centro de Informação Metal Mecânica, disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal>>, Acessado em 09 de Janeiro de 2013.
- [7] SILVEIRA, JOSÉ LUIS L., “Introdução ao Comando Numérico”, Departamento de , Mecânica,, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [8] Fórum CNC, Disponível em: <<http://www.cnczone.com>>, Acessado em: 22 de novembro de 2012.
- [9] Fender, Disponível em: <<http://www.fender.com/>>, Acessado em 03 de dezembro de 2012.
- [10] Mogno Brasileiro, disponível em: <<http://www.sementescaicara.com.br/Sementes/Mogno/maismogno.pdf>>, Acessado em 07 de fevereiro de 2013.
- [11] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Wood Handbook – Wood as Engineering Material, Centennial Ed.

USA, Wiscosin, 2010.

[12] Ferramentas, Disponível em: < www.american-cardibe.com>, Acessado em 02 de fevereiro de 2013:

[13] Fresadora CNC, disponível em: http://www.alibaba.com/product-gs/484849188/NC_R1325_1300_2500mm_CNC_ROUTER.html?s=p, Acessado em 27 de fevereiro de 2013

[14] CAPLA, RENATO LEMES., *Estudo da influência do sobremetal excedente de desbaste na operação de acabamento aplicando usinagem com altas velocidades*, Tese de M.Sc., Escola de Engenharia de São Paulo, USP, São Carlos, Brasil, 2006.

ANEXO I

Introdução às Funções Preparatórias Disponíveis no CE CNC

- G0 – Posicionamento rápido
- G1 – Interpolação linear com avanço programável
- G2 – Interpolação circular no sentido horário
- G3 – Interpolação circular no sentido anti-horário
- G4 – Tempo de permanência
- G20 – Programação em diâmetro
- G21 – Programação em raio
- G40 – Cancela compensação do raio da ponta da ferramenta
- G41 – Compensação do raio da ponta da ferramenta (ferramenta à esquerda na direção de avanço)
- G42 – Compensação do raio da ponta da ferramenta (ferramenta à direita na direção de avanço)
- G70 – Programação em polegada
- G71 – Programação em milímetro
- G90 – Programação em coordenadas absolutas
- G91 – Programação em coordenadas incrementais
- G94 – Programação do avanço em milímetro (ou polegada) por minuto
- G95 – Programação do avanço em milímetro (ou polegada) por rotação
- G96 – Programação em velocidade de corte constante em metros por minuto
- G97 – Programação em rotação por minuto

Funções Miscelâneas:

- M03 – Rotação da placa no sentido horário
- M04 – Rotação da placa no sentido anti-horário
- M06 – Libera a rotação da torre para a troca de ferramenta
- M11 – Seleciona a faixa de rotação de 5 a 520 RPM (Potência máxima de 194 a 390)
- M12 – Seleciona a faixa de rotação de 15 a 1560 RPM (Potência máxima de 390 a 1167)
- M13 – Seleciona a faixa de rotação de 40 a 4000 RPM (Potência máxima de 1167 a 3500)
- M30 – Fim do Programa

ANEXO II

G-Code

Devido ao tamanho demasiado grande do G-Code (mais de 80.000 linhas), não há a possibilidade de se inclui-lo por inteiro. É colocado apenas o começo e o final, como forma de ilustração.

```
(STRATO-FINAL)
(
DATE=DD-MM-YY - 13-02-13 TIME=HH:MM - 20:13)
(MCX FILE - C:\PROJETO FINAL\STRATO-FINAL.MCX)
(NC FILE - C:\USERS\USER\DESKTOP\STRATO-FINAL.NC)
(MATERIAL - WOOD INCH)
( T235 | 1/4 FLAT ENDMILL | H235 )
( T232 | 1/8 FLAT ENDMILL | H232 )
( T252 | 1/4 BALL ENDMILL | H252 )
N100 G20
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90
N104 T235 M6
N106 G0 G90 G54 X11.9724 Y9.1887 S5000 M3
N108 G43 H235 Z.25
N110 Z.1
N112 G1 X12.1462 Z.0694 F115.
N114 X11.8962 Z.0563
N116 X12.1462 Z.0122
N118 X11.8962 Z-.0009
N120 X12.1462 Z-.045
N122 X11.8962 Z-.0581
N124 X12.1462 Z-.1022
N126 X11.8962 Z-.1153
N128 X12.1462 Z-.1594
N130 X11.8962 Z-.1725
N132 X12.1462 Z-.2166
N134 X11.8962 Z-.2297
N136 X12.0057 Y8.996 F230.
N138 X12.0195
N140 G3 X12.2237 Y9.1218 R.24
N142 G1 X12.2539 Y9.1776
N144 X11.7289
N146 X11.5431 Y9.3593
N148 X12.3521
N150 X12.4503 Y9.5409
N152 X11.3574
N154 X11.1716 Y9.7226
N156 X12.5484
N158 X12.6466 Y9.9043
N160 X10.9859
N162 X10.8001 Y10.0859
N164 X12.7448
N166 X12.843 Y10.2676
N168 X10.6143
```

N170 X10.4286 Y10.4492
 N172 X12.9412
 N174 X13.0393 Y10.6309
 N176 X10.3083

 N178 G2 X10.3201 Y10.8125 R.303
 N180 G1 X13.1416
 N182 X13.3027 Y10.9942
 N184 X10.4803
 N186 X10.7012 Y11.1759
 N188 X13.4639
 N190 X13.6251 Y11.3575
 N192 X10.9222
 N194 X11.1432 Y11.5392
 N196 X13.7862
 N198 X13.9474 Y11.7208
 N200 X11.3641
 N202 X11.5851 Y11.9025
 N204 X14.1085
 N206 X14.2697 Y12.0841
 N208 X12.6523
 N210 X12.9497 Y12.2658
 N212 X14.3742
 N214 G3 X14.3857 Y12.4475 R.4279
 N216 G1 X13.2472
 N218 X13.5446 Y12.6291
 N220 X14.3126

.
 .
 .

N4774 X-8.0866 Y2.8394
 N4776 X-8.1697 Y2.8409
 N4778 X-8.294 Y2.8393
 N4780 X-8.4197 Y2.8331
 N4782 X-8.4502 Y2.8308
 N4784 X-8.4814 Y2.8283
 N4786 X-8.5438 Y2.8223
 N4788 X-8.6681 Y2.807
 N4790 X-8.8263 Y2.7806
 N4792 X-8.9112 Y2.763
 N4794 X-8.9704 Y2.7491
 N4796 X-9.0293 Y2.7342
 N4798 X-9.1483 Y2.7008
 N4800 X-9.2666 Y2.6643
 N4802 X-9.3846 Y2.6257
 N4804 X-9.5017 Y2.5848
 N4806 X-9.5592 Y2.5635
 N4808 X-9.6162 Y2.5417
 N4810 G3 X-9.7599 Y2.2187 R.25
 N4812 G1 X-9.6703 Y1.9853
 N4814 Z.1 F115.
 N4816 G0 Z2.
 N4818 M5
 N4820 G91 G28 Z0.

N4822 G28 X0. Y0.
N4824 M30
%